

cálculo das correntes de curto-circuito

índice

1. introdução	Os principais defeitos de curto-circuito	p. 4
	Estabelecimento da intensidade de curto-circuito	p. 6
	Normas e cálculo dos Icc	p.10
	Os métodos apresentados neste Caderno Técnico	p.11
	Hipóteses de base	p.11
2. cálculo das Icc pelo método das impedâncias	Icc consoante os diversos tipos de curto-circuito	p.13
	Determinação das diversas impedâncias de curto-circuito	p.14
	Relação entre as impedâncias dos diferentes níveis de tensão de uma instalação	p.23
	Exemplo de cálculo	p.25
3. Cálculo das Icc em redes radiais com ajuda das componentes simétricas	Interesse deste método	p.33
	Componentes simétricas (resumo)	p.33
	Cálculo de acordo com a norma CEI 909	p.35
	Equações das diferentes correntes	p.38
	Exemplo de cálculo	p.40
4. cálculos por computador e conclusão		p.44
Anexo: bibliografia		p.44

O dimensionamento de uma instalação eléctrica e dos equipamentos a utilizar e a escolha das protecções de pessoas e bens, necessitam do cálculo das correntes de curto-circuito em todos os pontos da rede.

Este Caderno Técnico enumera os métodos de cálculo das correntes de curto-circuito previstos pelas normas UTE 15-105 e CEI 909-781. Trata o caso de circuitos radiais BT – baixa tensão – e AT – Alta Tensão.

O objectivo que se pretende atingir é o de dar a devida informação sobre os métodos de cálculo para determinar com todo o conhecimento de causa as correntes de curto-circuito, incluindo a utilização de meios informáticos.

léxico

Abreviaturas

PdC	poder de corte
QGBT	quadro geral de baixa tensão

Símbolos

α	ângulo de ataque (aparecimento do defeito em relação ao zero da tensão)
c	factor de tensão
$\cos \varphi$	factor de potência
E	reactância em % das máquinas rotativas
E	força electromotriz (valor máximo)
c	ângulo de desfasamento (corrente em relação à tensão)
I	corrente (valor instantâneo)
i_a	componente alternada sinusoidal da corrente instantânea
i_c	componente contínua da corrente instantânea
i_p	valor máximo da corrente (primeira crista da corrente de defeito)
I	intensidade eficaz máxima
I_b	corrente de curto-circuito cortada (CEI 909)
I_{cc}	intensidade de curto-circuito permanente (I_{cc3} = trifásica, I_{cc2} = difásica, ...)
I_k	intensidade de curto-circuito permanente (CEI 909)
I''_k	corrente de curto-circuito inicial (CEI 909)
I_r	corrente nominal do alternador
I_s	intensidade da corrente de serviço
λ	factor dependente da indutância de saturação de um alternador
k e K	constantes dadas (tabelas ou ábacos)
R_m	resistência equivalente da rede a montante
R_L	resistência linear das linhas
S	secção dos condutores
S_{cc}	potência de curto-circuito
S_n	potência aparente do transformador
t_{min}	tempo morto mínimo de estabelecimento do curto-circuito, frequentemente igual à temporização de atraso de um disjuntor
u	tensão (valor instantâneo)
u_{cc}	tensão de curto-circuito do transformador (em %)
U	tensão composta da rede em vazio
U_n	tensão nominal em carga da rede
X_m	reactância equivalente da rede a montante
X_L	reactância linear das linhas
Z_m	impedância equivalente da rede a montante
Z_{cc}	impedância a montante da rede sobre defeito trifásico
Z_d, Z_i, Z_h	impedâncias directa, inversa e homopolar da rede, ou de um elemento
Z_L	impedância de ligação

1. introdução

Todas as instalações eléctricas devem ser protegidas contra curto-circuitos, tal devendo verificar-se, salvo excepções, sempre que haja uma descontinuidade eléctrica, o que mais frequentemente corresponde a uma mudança de secção dos condutores. A intensidade de curto-circuito deverá ser calculada nos diferentes níveis da instalação, para se poderem determinar as características do equipamento que deverá suportar ou cortar esta corrente de defeito.

O fluxograma da figura 1 mostra a abordagem que conduz às diferentes correntes de curto-circuito e os parâmetros resultantes para os diferentes dispositivos de protecção.

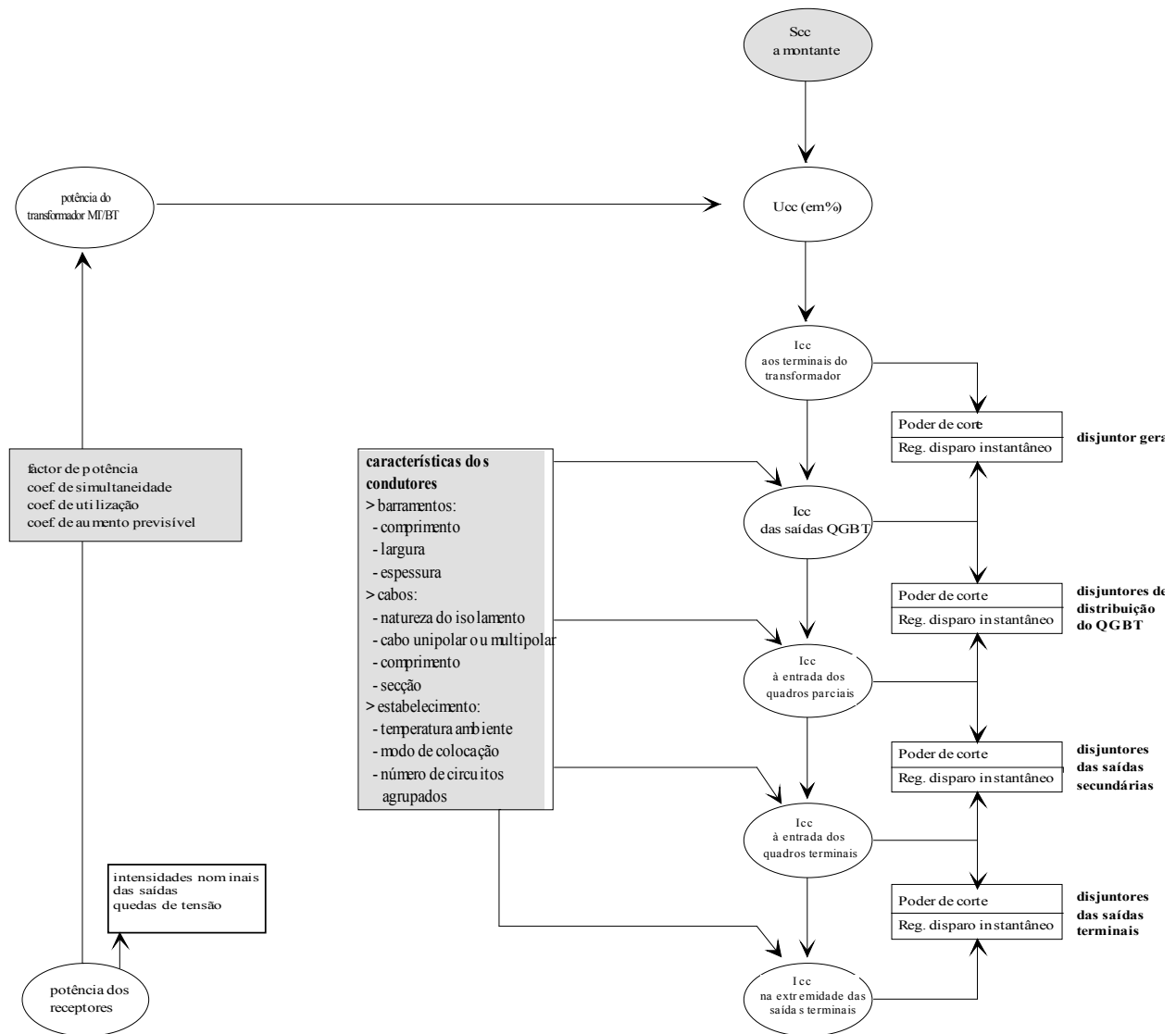


Fig. 1 : procedimento de cálculo de I_{cc} para a concepção de uma instalação eléctrica

Para escolher e regular convenientemente as protecções, devem ser conhecidos dois valores da corrente de curto-circuito:

- a corrente máxima de curto-circuito, que determina:
 - o poder de corte – PdC – dos disjuntores,
 - o poder de fecho dos aparelhos,
 - a robustez electrodinâmica das canalizações e da aparelhagem.

Corresponde a um curto-circuito na proximidade imediata dos terminais jusante do órgão de protecção. Deve ser calculada com uma boa precisão (margem de segurança).

- a corrente mínima de curto-circuito, indispensável para a escolha da curva de disparo dos disjuntores e dos fusíveis, em particular quando:
 - o comprimento dos cabos é importante e(ou) a fonte é relativamente impedante (geradores – onduladores);
 - a protecção das pessoas assenta no funcionamento dos disjuntores ou dos fusíveis, o que é essencialmente o caso nos esquemas de ligação à terra do neutro TN ou IT.

Recorde-se que a corrente de curto-circuito mínima corresponde a um defeito de curto-circuito na extremidade da canalização protegida quando ocorre um defeito bifásico e nas condições de exploração menos severas (defeito na extremidade de um *feeder* e não imediatamente após a protecção, um único transformador em serviço quando podem estar dois ligados, etc.).

Recorde-se também que em todos os casos, qualquer que seja a corrente de curto-circuito (da mínima à máxima), a protecção deverá eliminar o curto-circuito num tempo (t_c) compatível com a solicitação térmica que o cabo protegido pode suportar:

$$\int i^2 \cdot dt \leq k^2 \cdot S^2 \quad (\text{cf. fig. 2, 3, 4})$$

em que S é a secção dos condutores, e k uma constante calculada a partir de diferentes factores de correcção, função da forma de estabelecimento dos condutores, do número de circuitos contíguos, da natureza do solo, etc.

os principais defeitos de curto-circuito

Nas instalações eléctricas podem ocorrer diferentes curto-circuitos:

Características dos curto-circuitos

Os curto-circuitos são principalmente caracterizados pela:

- sua duração: auto-extintor, fugidio ou permanente;
- sua origem:
 - mecânica (rotura de condutores, ligação eléctrica accidental entre dois condu-

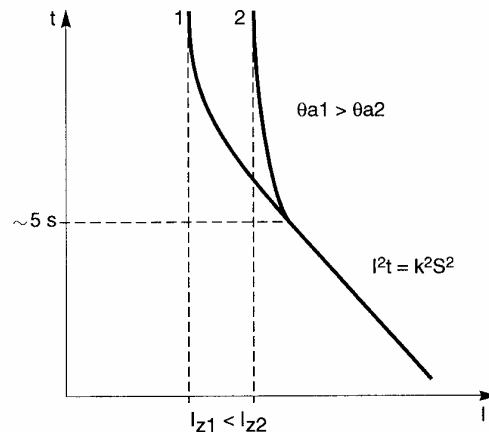


Fig. 2 : características I^2t de um condutor em função da temperatura ambiente

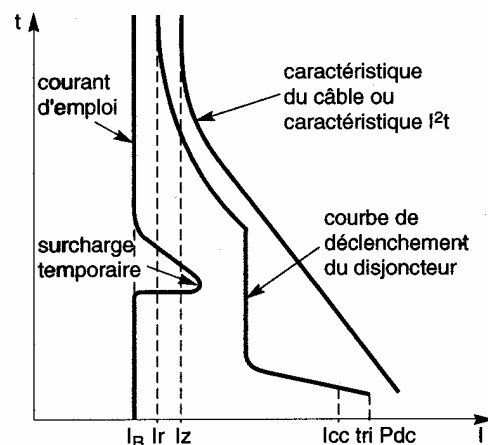


Fig. 3 :protecção de um circuito por disjuntor

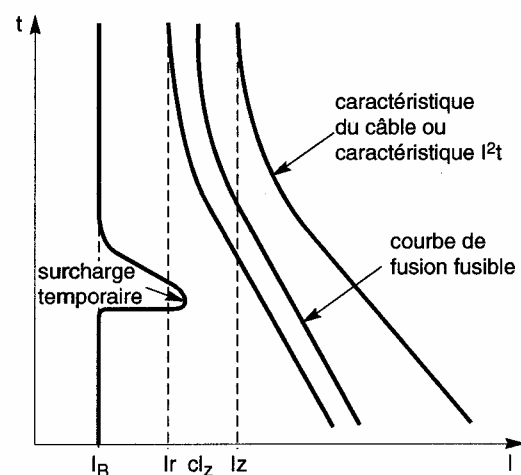


Fig. 4 : protecção de um circuito por fusível aM

- tores por um corpo estranho condutor ou por animais),
- sobretensões eléctricas, de origem interna ou atmosférica,
- ou devido a uma degradação do isolamento, consequência de calor, humidade ou ambiente corrosivo;
- sua localização: interna ou externa a uma máquina ou a um quadro eléctrico.

Entre outras características, os curto-circuitos podem ser:

- monofásicos: 80 % dos casos;
- bifásicos: 15 % dos casos. Estes defeitos degeneram frequentemente em defeitos trifásicos;
- trifásicos: apenas 5 % de origem.

Estas diferentes correntes de curto-circuito são representadas na figura 5.

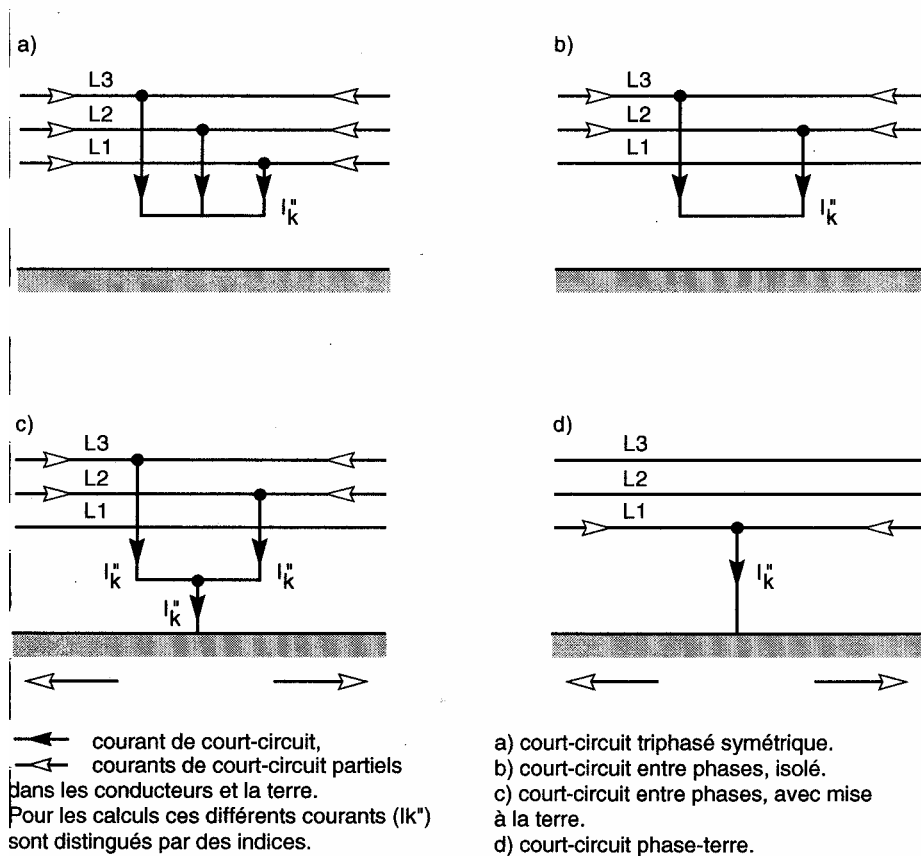


Fig. 5 : os diferentes curto-circuitos e as suas correntes. O sentido indicado pelas flechas é arbitrário. (cf. CEI 909)

Consequências dos defeitos de curto-circuito

As consequências dos defeitos de curto-circuito variam consoante a natureza e a duração dos defeitos, o local a que respeitam e a intensidade da corrente:

- no local do defeito:
 - ocorrência de arcos de defeito, tendo por consequência:
 - deterioração dos isolamentos,
 - fusão dos condutores,
 - incêndio e perigo para as pessoas;

- no circuito afectado:
 - esforços electrodinâmicos, provocando
 - deformação dos barramentos,
 - arrancamento de cabos;
 - sobreaquecimento devido ao aumento de perdas por efeito Joule, com risco de deterioração de isolamentos;
- nos outros circuitos eléctricos da rede afectada ou de redes situadas na proximidade:
 - falhas de tensão durante a duração da eliminação do defeito (de alguns milissegundos a algumas centenas de milissegundos),
 - colocação fora de serviço de uma parte maior ou menor da rede, consoante o seu esquema e a selectividade das suas protecções,
 - instabilidade dinâmica e(ou) perda de sincronismo das máquinas,
 - perturbações nos circuitos de comando e controle
 - etc.

estabelecimento da intensidade de curto-circuito

Uma rede simplificada reduz-se a uma fonte de tensão alternada, um interruptor e uma impedância Z_{cc} que representa todas as impedâncias situadas a montante do interruptor, e uma impedância de carga Z_s (cf. fig. 6).

Na realidade, a impedância da fonte é composta por tudo o que está a montante do curto-circuito, com redes de tensões diferentes (AT, BT) e canalizações em série com secções e comprimentos diferentes.

No esquema da figura 6, estando o interruptor fechado circula na rede a corrente de serviço, de intensidade I_s .

Um defeito de impedância desprezável entre os pontos A e B origina uma corrente de curto-circuito I_{cc} de intensidade muito elevada, limitada unicamente pela impedância Z_{cc} .

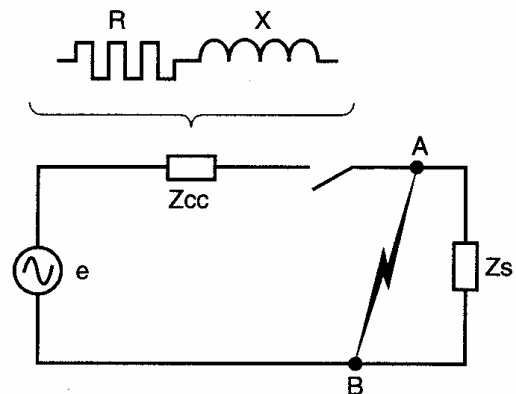


Fig. 6 : esquema simplificado de uma rede

A intensidade I_{cc} estabelece-se segundo um regime transitório, em função das reactâncias X e das resistências R que constituem a impedância Z_{cc} : $Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Em sistemas de potência, a reactância $X = \omega L$ é geralmente bastante mais elevada que a resistência R , situando-se a relação R / X entre 0,1 e 0,3 sendo para estes reduzidos valores praticamente igual ao $\cos \varphi_{cc}$ (em curto-circuito): $\cos \varphi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$.

Contudo, o regime transitório de estabelecimento da corrente de curto-circuito difere consoante o afastamento entre o local de defeito e os alternadores. Este afastamento não implica necessariamente uma distância geográfica, mas subentende que as impedâncias dos alternadores são inferiores às impedâncias de ligação entre estes e o local do defeito.

Defeito afastado dos alternadores

Constituem o caso mais frequente. O regime transitório é neste caso o resultante da aplicação a um circuito indutivo (ou “self-resistência”) de uma tensão: $e = E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$.

A intensidade é nesta situação a soma de duas componentes: $i = i_a + i_c$.

- uma (i_a) é alternada sinusoidal: $i_a = I \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$, em que
 - I – intensidade máxima = $\frac{E}{Z_{cc}}$
 - α – ângulo eléctrico que caracteriza a diferença (tempo) entre o instante inicial do defeito e a origem da onda de tensão.
- A outra (i_c) é uma componente contínua:

$$I_c = -I \cdot \sin \alpha \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

O seu valor inicial depende de α e o seu amortecimento é tanto mais rápido quanto a relação R/L for mais elevada.

No instante inicial do curto-circuito i é nula por definição (desprezando-se a corrente de serviço I_s), ou seja: $i = i_a + i_c = 0$.

Na figura 7 representa-se a construção gráfica de i obtida por adição algébrica das ordenadas das duas componentes i_a e i_c .

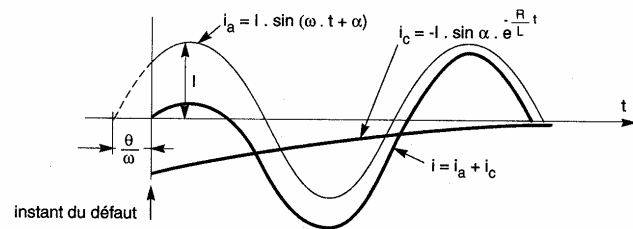


Fig.7 : representação gráfica e decomposição da corrente de um curto-circuito num ponto afastado de um alternador

A figura 8 ilustra os dois casos extremos possíveis de estabelecimento de uma corrente de curto-circuito, os quais, para maior facilidade de compreensão, são representados com uma tensão alternada monofásica.

O factor $e^{-\frac{R}{L}t}$ é tanto mais elevado quanto mais fraco for o amortecimento da componente contínua, como a relação R/L ou R/X .

Torna-se portanto necessário calcular i_p para se poder determinar o poder de fecho dos disjuntores a instalar, mas também para definir os esforços electrodinâmicos que o conjunto da instalação deverá suportar.

O respectivo valor deduz-se a partir do valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrico pela relação: $I_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a$, sendo o coeficiente K dado pela curva da figura 9 em função da relação R/X , ou R/L .

Defeito na proximidade dos alternadores

Quando o defeito ocorre na proximidade imediata do alternador que alimenta o circuito em causa, a variação da impedância agora preponderante do alternador provoca um amortecimento da corrente de curto-circuito.

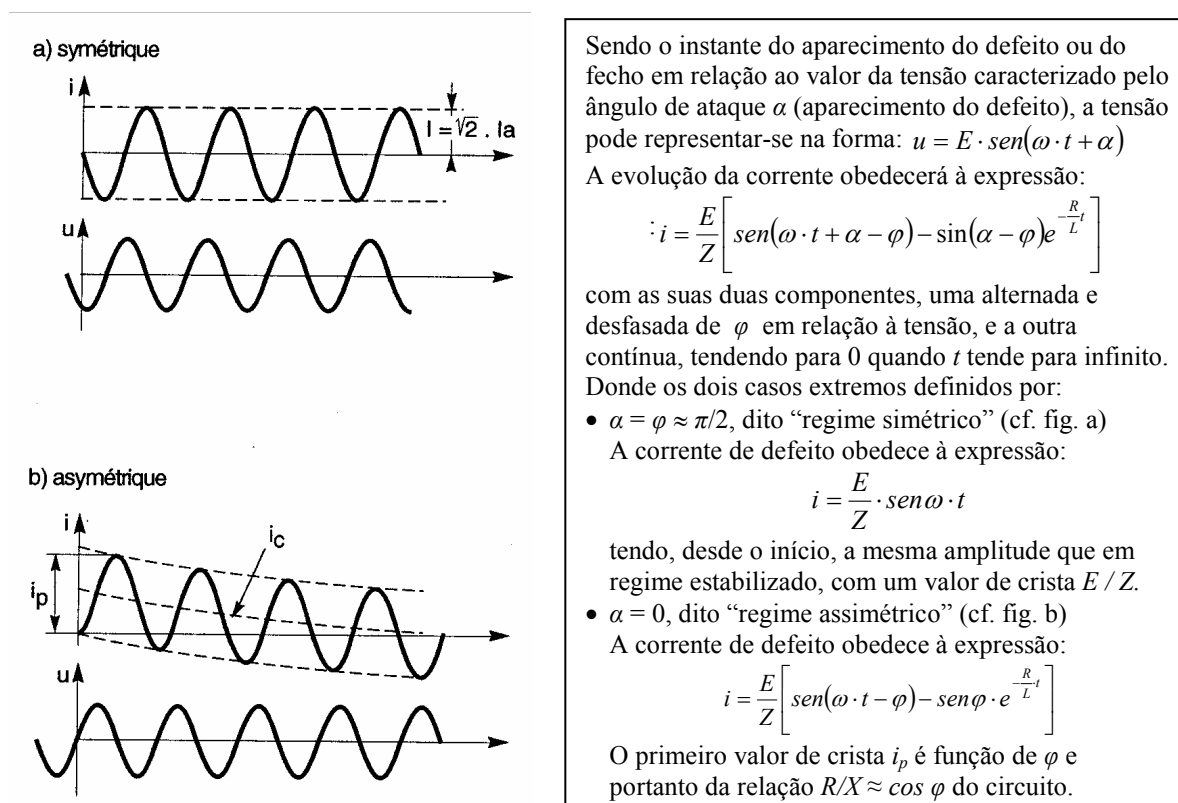


Fig. 8 : equações e representação gráfica dos dois casos extremos de uma corrente de curto-circuito, simétrica e assimétrica

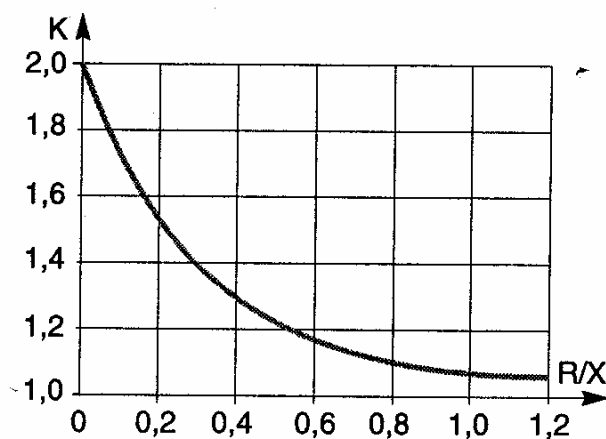


Fig. 9 : variação do factor K em função de R/X , ou R/L (cf. CEI 909)

Com efeito, neste caso o regime transitório de estabelecimento da corrente é complicado pela variação da f.e.m. (força electromotriz) resultante do curto-circuito. Para simplificar, considera-se constante a f.e.m., e variável a reactância interna da máquina; esta reactância evolui segundo três estados:

- **subtransitório**, que ocorre durante os primeiros 20 a 30 milissegundos do defeito;
- **transitório**, que se pode prolongar até 500 milissegundos;
- **permanente**, ou reactância síncrona.

Note-se que, pela ordem indicada, esta reactância assume em cada estado um valor mais elevado: a reactância subtransitória é inferior à reactância transitória e esta inferior à reactância permanente. Esta intervenção sucessiva das três reactâncias provoca uma diminuição progressiva da intensidade de curto-circuito, intensidade esta que é portanto a soma de quatro componentes (cf. fig. 10):

- as três componentes alternadas (subtransitória, transitória e permanente);
- a componente contínua, que resulta do estabelecimento da corrente no circuito (indutiva).

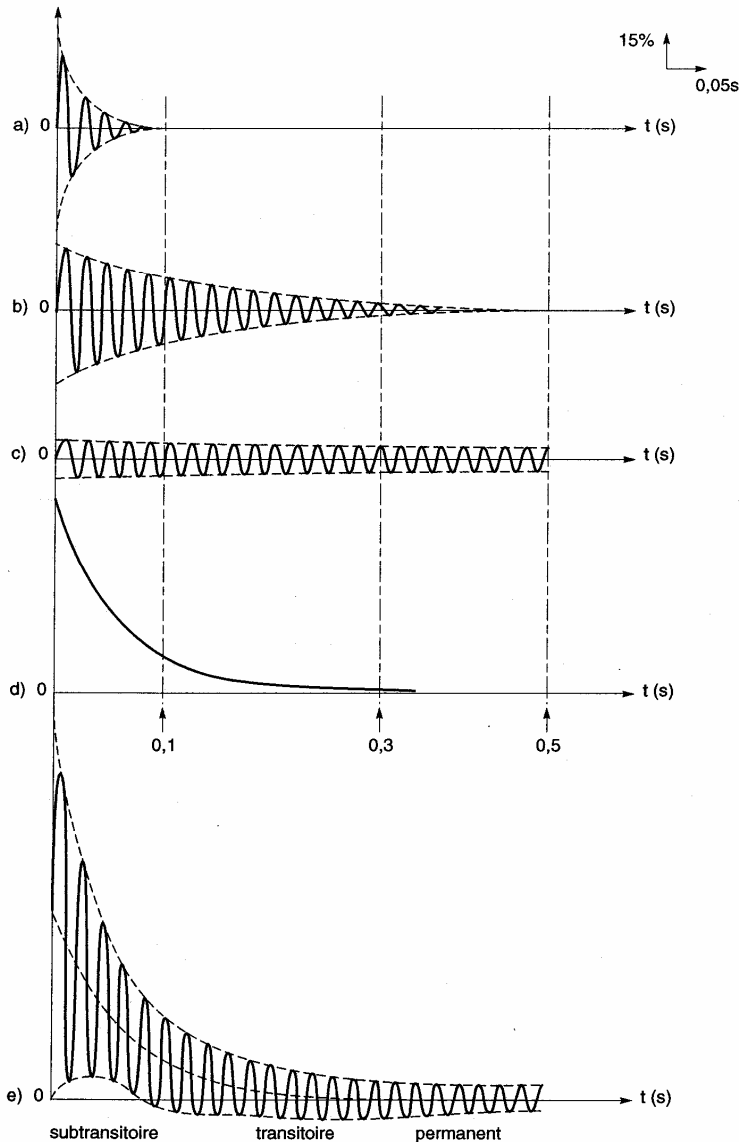


Fig. 10 : contribuição para a corrente total de curto-circuito I_{cc} (e) da:

- a) reactância subtransitória,
- b) reactância transitória,
- c) reactância permanente,
- d) componente contínua.

Note-se que o decréscimo da reactância do alternador é mais rápido que o da componente contínua. Esta situação, rara, pode levantar problemas de corte e de saturação dos circuitos magnéticos porque a corrente só passa por zero após vários períodos.

decorre entre o aparecimento da corrente de curto-circuito e a primeira separação dos contactos de um pólo do aparelho de manobra.

Na figura 11 representam-se as diferentes correntes de curto-circuito acima definidas.

Na prática, o conhecimento da evolução da corrente de curto-circuito em função do tempo nem sempre é indispensável:

- em BT, devido à rapidez dos aparelhos de corte, o conhecimento da corrente de curto-circuito subtransitória, I''_k , e da amplitude máxima de crista assimétrica i_p é suficiente para a determinação do PdC dos aparelhos de protecção e dos esforços electrodinâmicos.

- Em contrapartida, em distribuição BT de potência e em AT, a corrente de curto-circuito transitória é frequentemente utilizada se o corte se verificar antes de ser atingida a corrente de curto-circuito permanente. Torna-se neste caso interessante introduzir a corrente de curto-circuito cortada, I_b , que determina o PdC dos disjuntores retardados. I_b é o valor da corrente de curto-circuito no instante efectivo do corte, e portanto após um tempo t depois do estabelecimento do curto-circuito, com $t = t_{min}$. O tempo t_{min} (tempo morto mínimo) é a soma do atraso (temporização) mínimo de funcionamento de um relé de protecção e o menor tempo de abertura do disjuntor a que está associado. Trata-se do tempo mais curto que

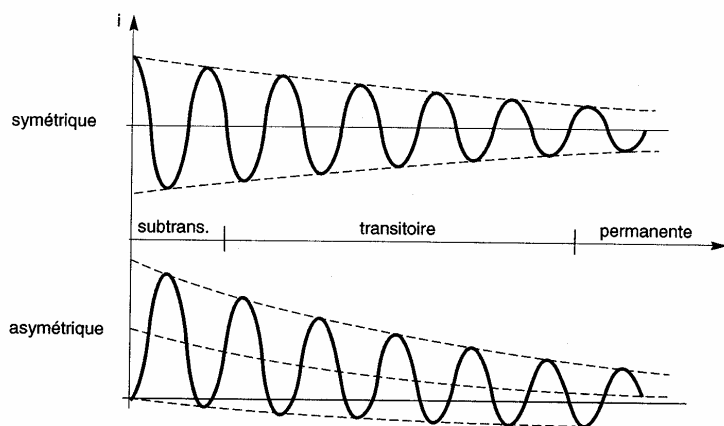


Fig. 11 : correntes de um curto-circuito próximo de um alternador (traçado esquemático)

normas e cálculos das Icc

Vários métodos são propostos pelas normas:

- o guia prático C 15-105, que completa a norma NF C 15-100 (instalações BT alimentadas em corrente alternada) apresenta os quatro métodos seguintes:
 - o método das “impedâncias”, que permite calcular as correntes de defeito em todos os pontos de uma instalação com uma boa precisão.

Este método consiste em

totalizar separadamente as diferentes resistências e reactâncias da malha de defeito, a partir da e incluindo a fonte, até ao ponto considerado; seguidamente, calcular a impedância correspondente. I_{cc} é finalmente obtida por aplicação da lei de Ohm: $I_{cc} = U_n / \sum(Z)$.

Deverão ser conhecidas todas as características dos diferentes elementos da malha de defeito (fontes e canalizações).

- o método da “composição”, utilizável quando as características da alimentação não são conhecidas. A impedância a montante do circuito considerado é calculada a partir de estimativa da corrente de curto-circuito na sua origem. O factor de potência $\cos \varphi_{cc} \approx R / X$ é considerado idêntico na origem do circuito e no ponto do defeito. Por outras palavras, tal consiste em admitir que as impedâncias elementares de dois troços consecutivos da instalação têm argumentos suficientemente aproximados para justificar a substituição das somas vectoriais por somas algébricas das impedâncias. Esta aproximação permite obter o valor do módulo das correntes de curto-circuito com uma precisão suficiente para acrescentar um circuito. Este método aproximado apenas se aplica a instalações de potência inferior a 800 kVA.
- o método “convencional”, que permite, sem serem conhecidas as impedâncias ou as I_{cc} da parte da instalação a montante do circuito considerado, calcular as correntes de curto-circuito mínimas e as correntes de defeito na extremidade de uma canalização.
Este método baseia-se na hipótese de que a tensão na origem do circuito é igual a 80 % da tensão nominal da instalação ao longo da duração do curto-circuito ou do defeito. O método apenas considera a resistência dos condutores à qual, para as secções elevadas, aplica um coeficiente de multiplicação para ter em conta a sua indutância (1,15 para 150 mm², 1,20 para 185 mm², etc).
Este método é essencialmente utilizado para os circuitos terminais cuja origem esteja suficientemente distanciada da fonte de alimentação (rede ou grupo).
- o método “simplificado” que, por consulta de tabelas estabelecidas com numerosas hipóteses simplificativas, indica directamente para cada secção de condutor:
 - a corrente nominal do dispositivo de protecção contra sobrecargas,
 - os comprimentos máximos das canalizações protegidas contra contactos indirectos,
 - os comprimentos admissíveis do ponto de vista das quedas de tensão.

Os quadros citados apresentam de facto resultados de cálculos efectuados essencialmente pelos métodos da composição e convencional. Este método permite determinar as características de um circuito acrescentado a uma instalação existente cujas características não sejam suficientemente conhecidas. Aplica-se directamente às instalações BT, com coeficientes de correcção se a tensão for diferente de 230/400 V.

- a norma CEI 909 (VDE 0102) aplica-se a todas as redes, radiais e malhadas, até à tensão de 230 kV. Baseada no teorema de Thévenin, o método consiste em calcular uma fonte de tensão equivalente no ponto de curto-circuito para de seguida calcular a corrente no mesmo ponto. Todas as alimentações da rede e as máquinas síncronas e assíncronas são substituídas pelas suas impedâncias (directa, inversa e homopolar). Com este método, todas as capacidades de linha e as admitâncias em paralelo das cargas não rotativas, salvo as do sistema homopolar, são desprezadas.
- existem outros métodos, que exploram o princípio da sobreposição e que necessitam de um cálculo prévio da corrente de carga. De referir também a norma CEI 865 (VDE 0103) que conduz ao cálculo da corrente de curto-circuito termicamente equivalente.

os métodos apresentados neste Caderno Técnico

Neste Caderno Técnico são estudados em particular dois métodos de cálculo das correntes de curto-circuito nas redes radiais:

- o primeiro, cuja utilização é sobretudo reservada para as redes BT, é o método das impedâncias. Este método foi escolhido pela precisão que permite obter e pelo seu aspecto didáctico, uma vez que necessita de ter em linha de conta a quase totalidade das características do circuito considerado.
- o segundo, utilizado principalmente em AT, é o método da norma CEI 909, escolhido pela sua precisão e pelo seu aspecto analítico. Trata-se de um método mais técnico, que explora o princípio das componentes simétricas.

hipóteses de base

Para estes cálculos das correntes de curto-circuito, são necessárias hipóteses que precisem o domínio de validade das fórmulas dadas. Frequentemente simplificativas e acompanhadas por aproximações justificadas, estas hipóteses tornam mais simples a compreensão dos fenómenos físicos bem como o cálculo das correntes de curto-circuito, conservando uma precisão aceitável e por excesso.

As hipóteses a considerar neste documento são:

- a rede considerada é radial e a sua tensão nominal vai da BT à AT (não ultrapassando 230 kV, limite dado pela norma CEI 909);
- a corrente de curto-circuito, quando de um curto-circuito trifásico, é suposta estabelecer-se simultaneamente nas três fases;

- durante a duração do curto-circuito, o número de fases implicadas não se altera: um defeito trifásico permanece trifásico, da mesma forma que um defeito fase-terra permanece fase-terra ;
- durante todo o tempo de duração do curto-circuito, as tensões que originaram a circulação da corrente e a impedância de curto-circuito não variam de forma significativa;
- os reguladores ou comutadores de tomadas dos transformadores são supostos estar em posição média (no caso de um curto-circuito afastado dos alternadores, podem ignorar-se as posições reais dos comutadores de tomadas dos transformadores);
- as resistências de arco não são tidas em conta;
- todas as capacidades das linhas são desprezadas;
- as correntes de carga são desprezadas;
- todas as impedâncias homopolares são tidas em conta.

2. cálculo das I_{cc} pelo método das impedâncias

I_{cc} consoante os diferentes tipos de curto-circuito

- **Curto-circuito trifásico**

É o defeito correspondente à reunião das três fases. A intensidade de curto-circuito I_{cc3} é:

$$I_{cc3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

sendo U (tensão composta ou entre fases) correspondente à tensão em vazio do transformador, superior em 3 a 5% à tensão aos terminais em carga. Por exemplo, nas redes a 380 V a tensão composta adoptada será $U = 400$ V, sendo a tensão simples $U / \sqrt{3} = 230$ V.

O cálculo da intensidade de curto-circuito resume-se então ao cálculo da impedância Z_{cc} , impedância equivalente a todas as impedâncias percorridas pela corrente I_{cc} desde o gerador até ao local do defeito – da fonte e das linhas (ver figura 12). Trata-se de facto da impedância “directa” por fase:

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

sendo:

$\sum R$ = soma das resistências em série

$\sum X$ = soma das reactâncias em série

O defeito trifásico é geralmente considerado ser aquele que provoca as correntes de defeito mais elevadas. Com efeito, a corrente de defeito no esquema equivalente de um sistema polifásico apenas é limitada pela impedância de uma fase sob a tensão simples da rede. O cálculo de I_{cc3} é portanto indispensável para escolher os equipamentos (intensidades e esforços electrodinâmicos máximos a suportar).

- **Curto-circuito bifásico isolado**

Corresponde a um defeito entre duas fases, alimentado sob uma tensão composta U . A intensidade I_{cc2} debitada é nesta situação inferior à do defeito trifásico:

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} \approx 0,86 \cdot I_{cc3}$$

- **Curto-circuito monofásico isolado**

Corresponde a um defeito entre uma fase e o neutro, alimentado sob uma tensão simples $V = U / \sqrt{3}$. A intensidade I_{cc1} debitada é, nesta situação:

$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

Em certos casos particulares de defeitos monofásicos a impedância homopolar da fonte é inferior a Z_{cc} (por exemplo, aos terminais de um transformador de ligação estrela – zig zag

ou de um alternador em regime subtransitário). A intensidade monofásica por ser então mais elevada que a do defeito trifásico.

- **Curto-circuito à terra (monofásico ou bifásico)**

Este tipo de defeito faz intervir a impedância homopolar Z_0 . Salvo em presença de máquinas rotativas em que a impedância homopolar é reduzida, a intensidade I_{cc_h} debitada é nesta situação inferior à do defeito trifásico.

- **Quadro-resumo das diferentes correntes de curto-circuito**

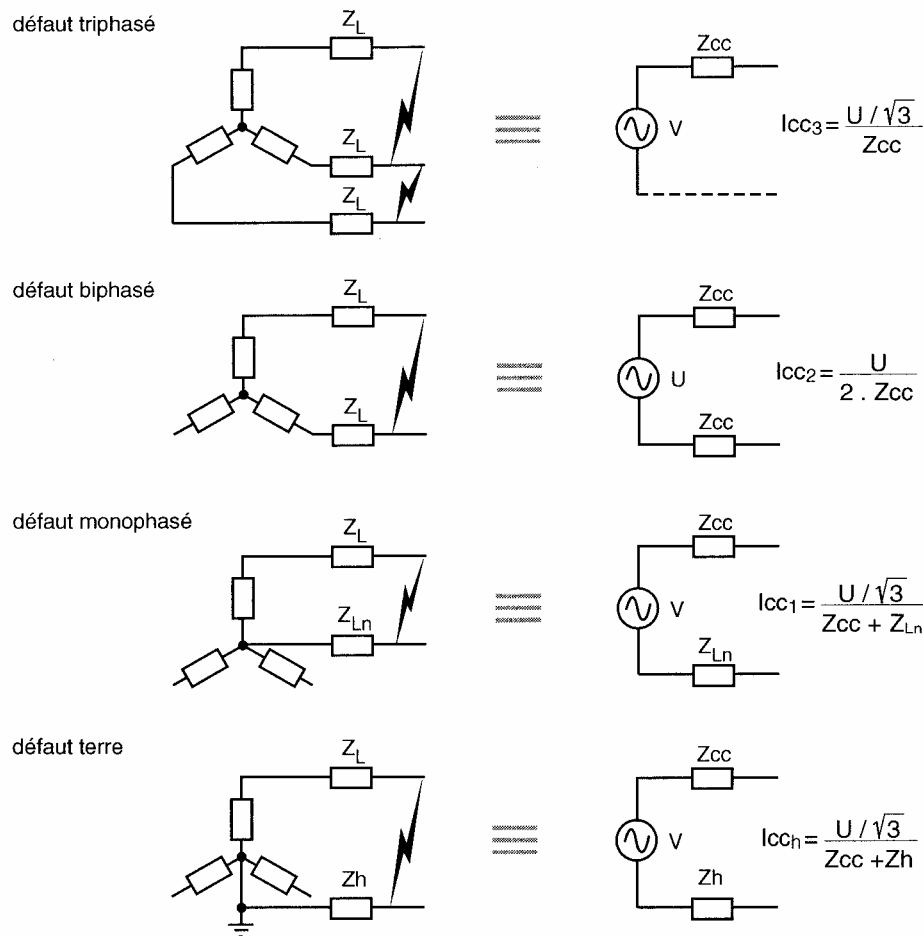


Fig. 12: as diferentes correntes de curto-circuito

determinação das diversas impedâncias de curto-circuito

O princípio deste método consiste em determinar as correntes de curto-circuito a partir da impedância que representa o “circuito” percorrido pela corrente de curto-circuito. Esta impedância calcula-se após serem totalizadas separadamente as diferentes resistências e reactâncias da malha de defeito, a partir da e incluindo a fonte de alimentação do circuito, até ao ponto considerado.

(Os números $\langle x \rangle$ permitem, a partir do exemplo situado no final do capítulo, reencontrar as explicações dadas no texto).

Impedâncias da rede

- impedância da rede a montante

Na maior parte dos cálculos, não se sobe acima do ponto de entrega da energia. O conhecimento da rede a montante limita-se então, em geral, às indicações fornecidas pelo distribuidor, ou seja, apenas a *potência de curto-circuito* S_{cc} (em MVA).

A impedância equivalente da rede a montante Z_m é:

$$\langle 1 \rangle \quad Z_m = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

sendo U a tensão composta da rede em vazio.

A resistência e a reactância da rede a montante deduzem-se a partir da relação R_m / Z_m em AT por:

- $R_m / Z_m \approx 0,3$ em 6 kV
- $R_m / Z_m \approx 0,2$ em 20 kV
- $R_m / Z_m \approx 0,1$ em 150 kV

$\langle 2 \rangle$ (No exemplo, $X_m = 0,980 Z_m$ em 20 kV, donde a aproximação $X_m \approx Z_m$.)

- impedância interna do transformador

A impedância calcula-se a partir da tensão de curto-circuito u_{cc} expressa em percentagem:

$$Z_T = \frac{u_{cc} \cdot U^2}{100 \cdot S_n}$$

em que:

U – tensão composta em vazio do transformador

S_n – potência nominal do transformador

u_{cc} – tensão de curto-circuito do transformador

Para os transformadores MT / BT de distribuição pública, indicam-se na tabela seguinte os valores de u_{cc} constantes de catálogo de fabricante, respeitantes a transformadores trifásicos de distribuição, herméticos, imersos em óleo mineral, para instalação interior ou exterior:

Potência do transformador	kVA	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
u_{cc} ($U \leq 24$ kV)	%	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
u_{cc} ($U = 36$ kV)	%	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Fig. 13: Tensões de curto-circuito indicadas no catálogo de Transformadores de Distribuição Herméticos, da EFACEC
[Obs: U refere-se à tensão (primária) mais elevada]

Refira-se, a propósito, que a precisão destes valores tem influência imediata no cálculo de I_{cc} , dado que um erro de x % em u_{cc} induz um erro da mesma ordem (x %) em Z_T .

⟨4⟩ Em geral verifica-se que $R_T \ll X_T$, da ordem de 0,2 X_T e a impedância interna dos transformadores pode ser assimilada à reactância X_T . Contudo, para as pequenas potências o cálculo de Z_T torna-se necessário porque a relação R_T / X_T é mais elevada. Aquela resistência calcula-se então a partir das perdas de Joule P_{cu} (ou “perdas no cobre”, ou ainda “perdas devidas à carga (75°)” conforme designação no catálogo citado) nos enrolamentos:

$$P_{cu} = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_n^2} \quad \text{ou} \quad R_T = \frac{U^2 \cdot P_{cu}}{S_n^2}$$

⟨5⟩ Observações:

- quando n transformadores estão ligados em paralelo e têm potências iguais, os seus valores de impedância interna, bem como de resistência ou de reactância serão divididos por n .
- é conveniente prestar particular atenção aos transformadores especiais: por exemplo, os transformadores de grupos rectificadores têm valores de u_{cc} que atingem 10 a 12% para limitar a corrente de curto-circuito.

Tendo em conta a impedância a montante e a impedância interna do transformador, a corrente de curto-circuito é expressa por:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_m + Z_T)}$$

Em primeira aproximação, Z_m e Z_T são assimiladas às suas respectivas reactâncias. A impedância de curto-circuito é neste caso igual à sua soma algébrica.

A impedância da rede a montante pode ser desprezada, e neste caso o novo valor da corrente é:

$$I'_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_T}$$

O erro relativo que se comete é:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I'_{cc} - I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{Z_m}{Z_T} = \frac{U^2 / S_{cc}}{u_{cc} \cdot U^2 / S_n} \quad \text{ou seja} \quad \frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{100}{u_{cc}} \cdot \frac{S_n}{S_{cc}}$$

A figura 14 indica o valor do erro (por excesso) no cálculo de I_{cc} consequente do facto de se desprezar a impedância a montante. Na figura constata-se que é possível desprezar esta impedância a montante em redes cuja potência de curto-circuito S_{cc} seja importante relativamente à potência S_n do transformador: como se verifica, com $S_{cc} / S_n = 300$ o erro cometido é de aproximadamente 5%.

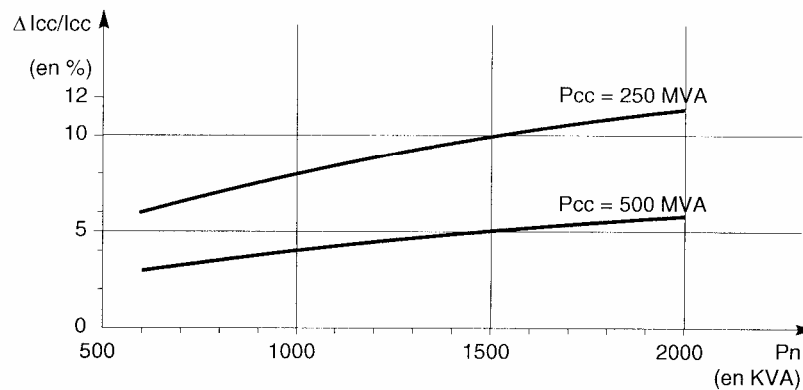


Fig. 14: erro introduzido no cálculo da corrente de curto-circuito quando se despreza a impedância Z_m da rede a montante

- impedância das ligações

A impedância das ligações depende da sua resistência e reactância lineares e do respectivo comprimento

- a resistência linear R_L das linhas aéreas, dos cabos e dos barramentos calcula-se pela equação:

$$R_L = \frac{\rho}{S}$$

sendo:

S – secção do condutor;

ρ – resistividade do condutor (o respectivo valor varia consoante a corrente de curto-circuito a calcular, máxima ou mínima)

⟨6⟩ O quadro da figura 15 indica estes valores para cada um dos casos.

Regra	Resistividade (*)	Valor da resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)		Condutores afectados
Corrente de curto-circuito máxima	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20^\circ}$	0,0225	0,036	F – N
Corrente de curto-circuito mínima	$\rho_1 = 1,5 \rho_{20^\circ}$	0,027	0,043	F – N
Corrente de defeito nos esquemas TN e IT	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20^\circ}$	0,0225	0,036	F – N (**) PE – PEN
Queda de tensão	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20^\circ}$	0,0225	0,036	F – N
Corrente de sobreintensidade para verificação das solicitações térmicas dos condutores	$\rho_1 = 1,5 \rho_{20^\circ}$	0,27	0,043	PEN – PE se incorporado num mesmo cabo multicondutor
	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20^\circ}$	0,0225	0,036	PE separado

(*) ρ_{20} – resistividade a 20°C : $0,018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ para o cobre e $0,029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ para o alumínio

(**) N – a secção do condutor neutro é inferior à dos condutores de fase

Fig. 15: valores da resistividade ρ dos condutores a considerar consoante a corrente de curto-circuito calculada, máxima ou mínima (cf. UTE C 15-105)

Na prática, em BT e para cabos de secção inferior a 150 mm^2 só a resistência é considerada. ($R_L < 0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$ com $S > 150 \text{ mm}^2$).

- o a reactância linear X_L das linhas aéreas, dos cabos e dos barramentos calcula-se pela equação:

$$X_L = L \cdot \omega = \left[15,7 + 144,44 \text{Log} \left(\frac{d}{r} \right) \right]$$

expressa em $\text{m}\Omega/\text{km}$ para um sistema de cabos monofásico ou trifásico em triângulo, sendo o logaritmo decimal e:

r – raio das almas condutoras (mm)






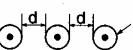
d – distância média entre os condutores (mm)

No caso das linhas aéreas, a reactância aumenta ligeiramente com o espaçamento entre os condutores (com $\text{Log}(d/r)$), e portanto com a tensão de utilização; são de considerar os valores médios seguintes:

$$\langle 7 \rangle \quad X = 0,3 \Omega / \text{km} \text{ (linhas BT ou MT)}$$

$$X = 0,4 \Omega / \text{km} \text{ (linhas MT ou AT)}$$

Para os cabos, e conforme o seu modo de estabelecimento, o quadro da figura 16 resume diferentes valores de reactância em BT.

mode de pose	jeux de barres	câble triphasé	câbles unipolaires espacés	câbles unipolaires serrés en triangle	3 câbles en nappe serrée	3 câbles en nappe espacée de "d"	d = 4r
schéma							
réactance linéique valeurs moyenne (en $\text{m}\Omega/\text{m}$)	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
réactance linéique valeurs extrêmes (en $\text{m}\Omega/\text{m}$)	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Serão de considerar os valores médios seguintes:

$X = 0,08 \text{ m}\Omega / \text{m}$ para um cabo trifásico, sendo este valor médio um pouco mais elevado em AT e compreendido entre 0,1 e $0,15 \text{ m}\Omega / \text{m}$;

$$\langle 8 \rangle \quad X = 0,09 \text{ m}\Omega / \text{m} \text{ para cabos unipolares juntos (em esteira ou em triângulo);}$$

$$\langle 9 \rangle \quad X = 0,15 \text{ m}\Omega / \text{m} \text{ por defeito para os barramentos e os cabos unipolares espaçados em esteira (este valor é sensivelmente mais baixo para barramentos em canalizações pré – fabricadas tipo Canalis – Telemecanique).}$$

Observações:

- o A impedância das ligações curtas entre o transformador MT/BT e o ponto de distribuição pode ser desprezada admitindo um erro por excesso na corrente de curto-circuito, erro esse tanto maior quanto mais elevada for a potência do transformador.
- o A capacidade dos cabos em relação à terra (modo comum), 10 a 20 vezes mais elevada que a das linhas, deverá ser tida em consideração para os defeitos à terra. A título indicativo, a capacidade de um cabo trifásico AT de 120 mm^2 de secção é da ordem de $1 \mu\text{F} / \text{km}$; contudo a corrente capacitiva é reduzida, da ordem dos $5 \text{ A} / \text{km}$ sob 20 kV .

- a resistência ou a reactância das ligações poderão ser desprezadas: se uma das duas grandezas R_L ou X_L for pequena relativamente à outra poderá ser desprezada, sendo pequeno o erro cometido no valor da impedância Z_L ; por exemplo, com uma relação igual a 3 entre R_L e X_L , o erro em Z_L é de 5,1%. A observação das curvas de R_L e X_L representadas na figura 17 permite deduzir as secções dos cabos para as quais a impedância pode ser reduzida à resistência ou à reactância.

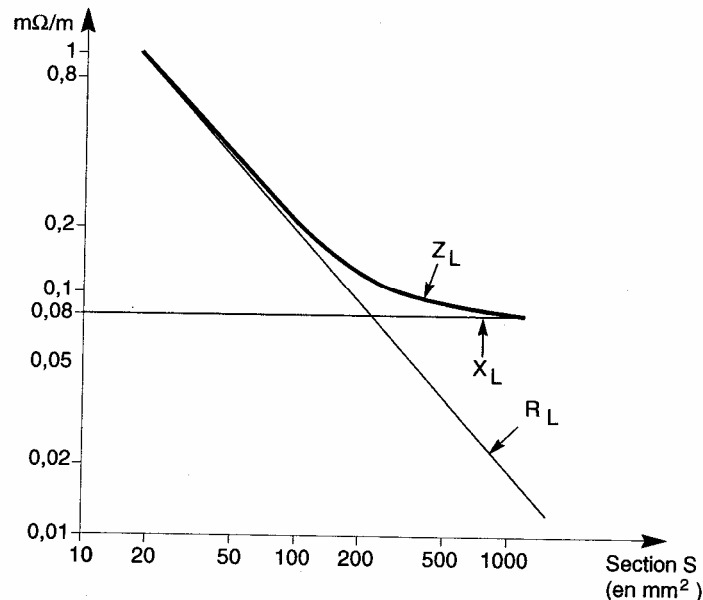


Fig. 17: impedância Z_L de um cabo trifásico, a 20° C, com condutores em cobre

Exemplos:

- 1º caso: cabo trifásico, a 20° C, com condutores em **cobre**. A reactância é igual a 0,08 mΩ/m. As curvas de R_L e X_L (cf. Fig. 17) mostram que a curva da impedância Z_L tem duas assintotas: a recta R_L para as secções reduzidas e a recta $X_L = 0,08$ mΩ/m para as secções elevadas. Para tais secções é portanto possível considerar que a curva da impedância Z_L se confunde com as suas assintotas. A impedância do cabo em causa é então redutível, com um erro inferior a 5,1%, a:
 - uma resistência, para secções inferiores a 74 mm².
 - uma reactância, para secções superiores a 660 mm².
- 2º caso: cabo trifásico, a 20° C, mas com condutores em **alumínio**. Como no caso anterior, a curva da impedância Z_L confunde-se com as suas assintotas, mas para secções inferiores a 120 mm² e superiores a 1000 mm² (curvas não representadas).

Impedância das máquinas rotativas

- alternadores síncronos

As impedâncias das máquinas são normalmente expressas sob a forma de uma percentagem, sob a forma:

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = 100\% / e$$

(sendo e o equivalente a u_{cc} dos transformadores).

Seja:

$$\langle 10 \rangle \quad Z = \frac{e}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}$$

em que U é a tensão em vazio no alternador e S_n a potência aparente (VA) do alternador.

- $\langle 11 \rangle$ Dado que a relação R / X é pequena, da ordem de 0,05 a 0,1 em AT e de 0,1 a 0,2 em BT, a impedância Z confunde-se com a reactância X . No quadro da figura 18 indicam-se valores de e para turboalternadores de rotor liso e para os alternadores “hidráulicos” de pólos salientes (velocidades reduzidas). Observando o citado quadro pode parecer surpreendente que as reactâncias permanentes de curto-circuito ultrapassem 100% (situação em que $I_{cc} < I_n$). Note-se porém que a intensidade de curto-circuito é essencialmente indutiva e recorre a toda a energia reactiva que o indutor pode fornecer mesmo sobreexcitado, enquanto a intensidade nominal veicula sobretudo a potência activa fornecida pela bobina.

	reactância subtransitória	reactância transitória	reactância permanente
turbo-alternador	10 - 20	15 - 25	150 - 230
alternadores de pólos salientes	15 - 25	25 - 35	70 - 120

Fig. 18 : valores de reactâncias de alternadores, em e %

- motores e compensadores síncronos

O comportamento destas máquinas em curto-circuito é semelhante ao dos alternadores:

- $\langle 12 \rangle$ elas debitam na rede uma intensidade que é função da sua reactância em % (ver figura 19)

	reactância subtransitória	reactância transitória	reactância permanente
motores de grandes velocidades	15	25	80
motores de pequenas velocidades	35	50	100
Compensadores	25	40	160

Fig. 19 : reactâncias em e % dos motores e compensadores síncronos

- motores assíncronos

Um motor assíncrono que seja separado bruscamente da rede mantém aos seus terminais uma tensão que se amortece em alguns centésimos de segundo. Quando ocorre um curto-circuito aos seus terminais, o motor debita nessa situação uma corrente que se anula ainda mais rapidamente com uma constante de tempo de aproximadamente:

- 2 / 100 s para motores de gaiola simples até 100 kW,
- 3 / 100 s para os motores de dupla gaiola, e para motores de potência superior a 100 kW,
- 3 a 10 / 100 s para muito grandes motores AT (1000 kW) de rotor bobinado.

O motor assíncrono constitui portanto, em caso de curto-circuito, um gerador ao qual se atribui uma impedância (somente subtransitória) de 20 a 25 %.

Concretamente, a grande quantidade de motores BT de fraca potência unitária existentes nas instalações industriais é um tema de reflexão, porque é difícil prever o número médio de motores em serviço que irão debitar sobre o defeito no momento de um curto-circuito. É logicamente inútil e fastidioso calcular individualmente a corrente de retorno de cada motor tendo em conta a sua impedância de ligação. Por esse motivo é habitual (principalmente nos USA) considerar globalmente a contribuição para a corrente de defeito do conjunto dos motores assíncronos BT de uma instalação.

⟨13⟩ Eles são, então, comparados a uma única fonte que debita no barramento uma intensidade igual a 3 vezes a soma das intensidades nominais de todos os motores instalados.

Outras impedâncias

- condensadores

Uma bateria de condensadores shunt situada na proximidade do local de defeito descarrega-se, aumentando assim a intensidade da corrente de curto-circuito. Esta descarga oscilante amortecida caracteriza-se por uma primeira crista de valor elevado que se sobrepõe à primeira crista da intensidade de curto-circuito, se bem que a sua frequência seja muito superior à da rede. Mas consoante a coincidência do instante inicial do defeito com a onda de tensão, podem ser encarados dois casos extremos:

- se este instante coincide com um zero de tensão a corrente de descarga da capacidade é nula, dado que precisamente a corrente de curto-circuito é assimétrica com uma primeira crista de amplitude máxima.
- inversamente, se este instante coincide com um máximo de tensão, a bateria debita uma corrente que se sobrepõe a uma primeira crista da corrente de defeito, de valor reduzido porque simétrica.

É portanto pouco provável que, salvo para baterias de potência muito elevada, esta sobreposição provoque uma primeira crista mais importante que a corrente de crista de um defeito assimétrico.

Por consequência, para cálculo da corrente máxima de curto-circuito não é necessário ter em conta as baterias de condensadores. Haverá contudo lugar a considerá-las para efeitos de escolha da tecnologia dos disjuntores; com efeito, quando da abertura, elas reduzem consideravelmente a frequência própria do circuito e têm assim incidência no processo de corte.

- aparelhagem

⟨14⟩ Alguns aparelhos (disjuntores, contactores com bobina de sopro, relés térmicos directos, etc.) apresentam uma impedância que pode ser tida em conta. Esta impedância apenas será de considerar, no cálculo de I_{cc} , para os aparelhos situados a montante daquele que deverá abrir sobre o curto-circuito e que permanecem fechados (disjuntores selectivos).

⟨15⟩ Por exemplo, no caso dos disjuntores BT é correcto considerar um valor de 0,15 mΩ para a reactância sendo a resistência desprezável.

Relativamente aos aparelhos de corte deve ser feita uma distinção consoante a rapidez da sua abertura:

- Alguns aparelhos abrem com grande rapidez e consequentemente reduzem fortemente as correntes de curto-circuito, como é o caso dos disjuntores designados “rápidos – limitadores”, tendo por efeito esforços electrodinâmicos e solicitações térmicas na parte afectada da instalação muito inferiores aos máximos teóricos.
- Outros aparelhos, tais como os disjuntores de disparo retardado, não oferecem esta vantagem.

- arco de defeito

A corrente de curto-circuito percorre frequentemente um arco, ao nível do defeito, cuja resistência é apreciável e muito flutuante: a queda de tensão de um arco de defeito varia entre 100 e 300 V.

Em AT este valor é desprezável relativamente à tensão da rede, não tendo o arco influência redutora na intensidade da corrente de curto-circuito.

Em BT, pelo contrário, a corrente real de um defeito com arco é tanto mais limitada relativamente à corrente calculada (defeito franco) quanto mais baixa for a tensão.

⟨16⟩ Por exemplo, o arco originado quando de um curto-circuito entre condutores ou num barramento pode reduzir a intensidade da corrente de curto-circuito presumida de 20 a 50% e por vezes mais de 50% para as tensões nominais inferiores a 440 V.

Este fenómeno, muito favorável em BT em cerca de 90% dos defeitos, não pode contudo ser tido em conta para a determinação do PdC (poder de corte) porque 10% dos defeitos ocorrem no fecho de um aparelho sobre um defeito franco, sem arco. Deverá ser considerado, pelo contrário, no cálculo da corrente de curto-circuito mínima.

- impedâncias diversas

Outros elementos podem acrescentar impedâncias não negligenciáveis. É o caso dos filtros anti-harmónicas e das selfs destinadas a limitar as correntes de curto-circuito, as quais é obviamente necessário ter em conta no cálculo, mas também dos transformadores de intensidade (TI's) de primário bobinado cuja impedância varia de acordo com o respectivo calibre e construção.

relações entre as impedâncias dos diferentes níveis de tensão de uma instalação

impedâncias em função da tensão

A potência de curto-circuito num determinado ponto da rede é definida por:

$$S_{cc} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = \frac{U^2}{Z_{cc}}$$

Esta expressão da potência de curto-circuito implica, por definição, que S_{cc} é invariável em qualquer ponto da rede, qualquer que seja a tensão.

E a expressão:

$$I_{cc_3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}}$$

implica que todas as impedâncias devam ser calculadas relativamente à tensão do ponto de defeito, do que resultará uma certa complicação e fonte de erros em cálculos respeitantes a redes com dois ou mais níveis de tensão.

Portanto, a impedância de uma linha AT deverá ser multiplicada pelo quadrado do inverso da relação de transformação quando se pretenda efectuar o cálculo de um defeito do lado BT do transformador:

$$\langle 17 \rangle \quad Z_{BT} = Z_{AT} \cdot \left(\frac{U_{BT}}{U_{AT}} \right)^2$$

Um método simples permite evitar estas dificuldades: o designado método das impedâncias relativas proposto por H. Rich.

cálculo das impedâncias relativas

Trata-se de um método de cálculo que permite estabelecer uma relação entre as impedâncias dos diferentes níveis de tensão de uma instalação eléctrica.

Este método baseia-se na seguinte convenção: as impedâncias (em Ω) são divididas pelo quadrado da tensão composta (em V) da rede no ponto em que se encontram em serviço; tornam-se assim impedâncias relativas.

- para as linhas e cabos, as resistências e reactâncias relativas são $R_R = \frac{R}{U}$ e $X_R = \frac{X}{U^2}$, sendo R e X expressos em ohm e U em volt.

- para os transformadores, a impedância exprime-se a partir da tensão de curto-circuito u_{cc} e da potência nominal S_n :

$$Z = \frac{u_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}$$

- para as máquinas rotativas a fórmula é idêntica: $Z = \frac{e}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}$, representando e a impedância expressa em %.

- para o conjunto, após compostas todas as impedâncias relativas, a potência de curto-circuito determina-se por:

$$S_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R}$$

deduzindo-se a intensidade de defeito I_{cc} no local de tensão U por:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \sum Z_R}$$

Exemplo de cálculo

Considere-se uma rede a 20 kV, na qual tem origem uma linha aérea com 2 km que alimenta um posto de transformação MT/BT, e um alternador de 1 MVA que alimenta em paralelo o barramento MT do mesmo posto. O posto comporta dois transformadores de 1000 kVA em paralelo, os quais alimentam um barramento BT ao qual estão ligadas 20 saídas de força-motriz iguais à do motor M (fig. 20). Estes 20 motores são ligados por cabos idênticos e estão todos em serviço no momento do defeito

A corrente I_{cc} deverá ser calculada nos diferentes pontos de defeito precisados no esquema da rede (fig. 20), ou sejam:

- em A, no barramento MT (de impedância desprezável);
- em B, no barramento BT a 10 m dos transformadores;
- em C, no barramento de um quadro secundário BT;
- em D, aos terminais de um motor M.

Seguidamente, calcular a corrente de retorno dos motores em C, D, B e A.

Obs. Neste exemplo, as reactâncias X e as resistências R são calculadas sob a sua tensão de instalação; o método das impedâncias relativas não é portanto utilizado.

rede a montante

$U_1 = 20 \text{ kV}$

$S_{cc} = 500 \text{ MVA}$

linha aérea

3 cabos 50 mm^2 em cobre

comprimento = 2 km

alternador

1 MVA

$Z_{subt.} = 15 \%$

2 transformadores

1000 kVA

rel. transformação 20000/410-237 V

$u_{cc} = 5 \%$

QGBT

barramento

3 barras $400 \text{ mm}^2/\text{fase}$, em cobre

comprimento = 10 m

ligação 1

3 cabos 400 mm^2 unipolares, alma condutora

em alumínio, espaçados em esteira

comprimento = 80 m

quadro BT secundário

ligação 2

3 cabos $1 \times 35 \text{ mm}^2$, cobre, em sist. trifásico

comprimento = 30 m

motor

50 kW

$e = 25 \%$

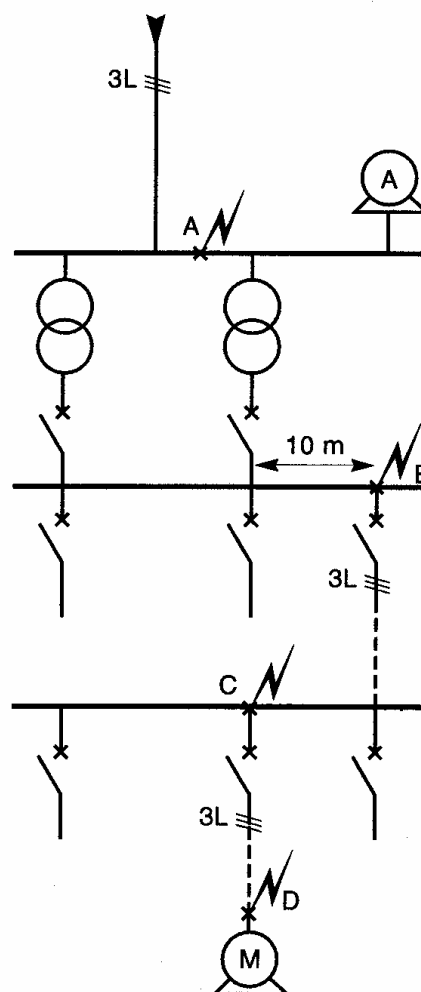


Fig. 20 : Problema: calcular I_{cc} nos pontos A, B, C e D

Resolução:

troço	cálculos		resultados	
20 kV			X (Ω)	R (Ω)
1. rede a montante	$Z_m = (20 \times 10^3)^2 / 500 \times 10^6$	$\langle 1 \rangle$		
	$X_m = 0,98 \times 0,8$	$\langle 2 \rangle$	0,78	
	$R_m = 0,2 \times 0,78$			0,15
2. linha aérea	$X_{LA} = 0,4 \times 2$	$\langle 7 \rangle$	0,8	
	$R_{LA} = 0,018 \times \frac{2000}{50}$	$\langle 6 \rangle$		0,72
3. alternador	$X_{Alt} = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \times 10^3)^2}{10^6}$	$\langle 10 \rangle$	60	
	$R_{Alt} = 0,1 \cdot 60$	$\langle 11 \rangle$		6
Defeito em A				
			X (mΩ)	R (mΩ)
4. transformadores	$Z_T = \frac{1}{2} \times \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6}$	$\langle 3 \rangle \langle 5 \rangle$		
	$X_T \approx Z_T$		4,2	
	$R_T = 0,2 \cdot X_T$	$\langle 4 \rangle$		0,84
410 V				
5. disjuntor	$X_d = 0,15$	$\langle 15 \rangle$	0,15	
6. barramento (3 × 400 mm ²)	$X_{bar} = 0,15 \times 10^{-3} \times 10$	$\langle 9 \rangle$	1,5	
	$R_{bar} = 0,0225 \times \frac{10}{3 \times 400}$	$\langle 6 \rangle$		≈ 0
Defeito em B				
7. disjuntor	$X_d = 0,15$	$\langle 15 \rangle$	0,15	
8. ligação 1 cabos 3×400 mm ²	$X_{c1} = 0,15 \times 10^{-3} \times 80$	$\langle 9 \rangle$	12	
	$R_{c1} = 0,036 \times \frac{80}{3 \times 400}$	$\langle 6 \rangle$		2,4
Defeito em C				
9. disjuntor	$X_d = 0,15$	$\langle 15 \rangle$	0,15	
10. ligação 2 3 cabos 35 mm ²	$X_{c2} = 0,09 \times 10^{-3} \times 30$	$\langle 8 \rangle$	2,7	
	$R_{c2} = 0,0225 \times \frac{30}{35}$	$\langle 6 \rangle$		19,2
Defeito em D				
11. motor 50 kW	$X_M = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{50 \times 10^3}$	$\langle 12 \rangle$	840	
	$R_M = 0,2 \cdot X_M$	$\langle 12 \rangle$		168

I – Defeito em A (barramento MT)

(elementos relacionados: 1, 2, 3)

A impedância “rede + linha” está em paralelo com a do alternador; mas esta última, sendo muito mais elevada, pode ser ignorada.

$$1. \quad \text{rede a montante: } S_{cc} = 500 \text{ MVA e } U = 20 \text{ kV} \Rightarrow Z_m = \frac{U^2}{S_{cc}} = 0,8\Omega$$

$$U = 20 \text{ kV} \Rightarrow R_m / Z_m \approx 0,2 \langle 1 \rangle \Rightarrow \cos \varphi = 0,2 \Rightarrow \sin \varphi = 0,98 \Rightarrow X_m = Z_m \cdot \sin \varphi = 0,78\Omega$$

$$\Rightarrow X_m \approx Z_m \Rightarrow R_m = 0,2 \cdot X_m = 0,15\Omega$$

$$2. \quad \text{linha aérea: } X_{La} = 0,4\Omega / \text{km} \langle 7 \rangle \times 2\text{km} = 0,8\Omega \quad R_{La} = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{S} = 0,72\Omega$$

$$3. \quad \text{alternador: } Z_{Alt} = \frac{e}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} = 60\Omega \quad R_{Alt} / X_{Alt} \approx 0,1 \Rightarrow Z_{Alt} \approx X_{Alt} \Rightarrow X_{Alt} = 60\Omega$$

$$R_{Alt} = 0,1 \cdot X_{Alt} = 6\Omega$$

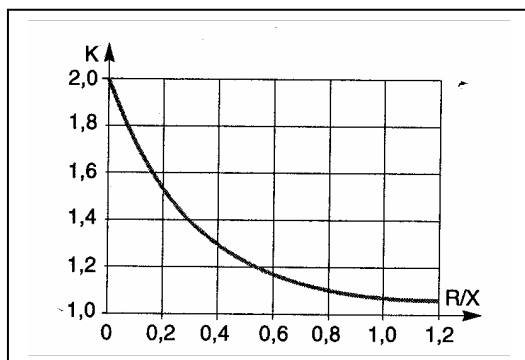
Desprezando a impedância do alternador, os valores a considerar para um defeito no ponto A serão:

$$R_A = R_m + R_{La} = 0,15 + 0,72 = 0,87\Omega$$

$$X_A = X_m + X_{La} = 0,78 + 0,8 = 1,58\Omega \quad \Rightarrow \quad Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \approx 1,8\Omega$$

$$\Rightarrow \quad I_{ccA} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_A} = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 1,8} \approx 6415 \text{ A}$$

A corrente I_{ccA} é a corrente de curto-circuito “permanente”; para calcular I'_{cc} (valor máximo assimétrico) deverá aplicar-se a expressão: $I' = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc}$ sendo k (por vezes designado por “factor de choque”) obtido a partir da figura 9:



$$\frac{R_A}{X_A} = \frac{0,87}{1,58} = 0,55 \quad \Rightarrow \quad k = 0,2$$

$$\Rightarrow \quad I'_{ccA} = 1,2 \times \sqrt{2} \times 6415 = 10887 \text{ A}$$

II – Defeito em B (barramento QGBT)

[elementos relacionados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6)]

As reactâncias X e as resistências R calculadas em MT deverão ser “reduzidas” à rede BT pela sua multiplicação pelo quadrado da relação entre tensões $\langle 17 \rangle$, ou seja:

$$R_{BT} = R_{MT} \cdot \left(\frac{U_{BT}}{U_{MT}} \right)^2 = R_{MT} \cdot \left(\frac{410}{20000} \right)^2 = R_{MT} \times 0,42 \times 10^{-3}$$

$$X_{BT} = X_{MT} \cdot \left(\frac{U_{BT}}{U_{MT}} \right)^2 = X_{MT} \cdot \left(\frac{410}{20000} \right)^2 = X_{MT} \times 0,42 \times 10^{-3}$$

4. transformadores: $\langle 3 \rangle \quad Z_T = \frac{u_{cc} \cdot U^2}{100 \cdot S_n} = 8,4 \times 10^{-3} \Omega = 8,4 m\Omega$

$\langle 5 \rangle \quad 2 \text{ transformadores em paralelo} \quad \Rightarrow \quad Z'_T = \frac{Z_T}{2} = 4,2 m\Omega$

$\langle 4 \rangle \quad X_T \approx Z_T \quad \Rightarrow \quad X_T = 4,2 m\Omega$
 $R_T \approx 0,2 X_T \quad \Rightarrow \quad R_T = 0,84 m\Omega$

5. disjuntor: $\langle 15 \rangle \quad X_d \approx 0,15 m\Omega \quad R_d \approx 0$

6. barramento MT: $\langle 9 \rangle \quad X_{bar} = 0,15 m\Omega / m \times 10 m = 1,5 \Omega$

$$R_{bar} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,0225 \times \frac{10}{3 \times 400} = 0,19 m\Omega \quad (\text{desprezável!!})$$

Valores totais no ponto B:

$$X_B = X_A \times 0,42 \times 10^{-3} + X_T + X_d + X_{bar} = (1,58 \times 0,42 + 4,2 + 0,15 + 1,5) \times 10^{-3} = 6,51 m\Omega$$

$$R_B = R_A \times 0,42 \times 10^{-3} + R_T = (0,87 \times 0,42 + 0,84) \times 10^{-3} = 1,2 m\Omega$$

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{1,2^2 + 6,51^2} = 6,62 m\Omega$$

Este cálculo permite observar, por um lado, a reduzida importância da impedância da rede a montante em relação à dos transformadores (tanto mais reduzida aliás quanto menor a potência do ou dos transformadores), e por outro lado que a impedância dos dez metros do barramento BT não é desprezável.

Corrente de curto-circuito “permanente” em B:

$$I_{ccB} = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot Z_B} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 6,62 \times 10^{-3}} = 35758 A$$

Potência de curto-circuito em B:

$$S_{ccB} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{ccB} = \sqrt{3} \times 410 \times 35758 = 25,4 \times 10^6 VA = 25,4 MVA$$

Corrente de curto-circuito máxima assimétrica em B:

$$\frac{R_B}{X_B} = \frac{1,2}{6,51} = 0,18 \quad \Rightarrow \quad k \approx 1,58 \quad \Rightarrow \quad I'_{ccB} = 1,58 \times \sqrt{2} \times 35758 \approx 79900 A$$

Se se considerar o arco de defeito (cf. <16>), a corrente I_{ccB} ficará compreendida entre um máximo de 28 606 A e um mínimo de 17 880 A (reduções de 20 e 50%, respectivamente).

III – Defeito em C (barramento de quadro secundário BT)

[elementos relacionados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8)]

Serão adicionadas às anteriores as reactâncias e resistências do disjuntor e dos cabos de ligação.

7. disjuntor: $\langle 15 \rangle \quad X_d \approx 0,15 m\Omega \quad R_d \approx 0$

8. ligação 1: 3 cabos unipolares por fase, LSVV 400 mm², estabelecidos em esteira horizontal com espaçamento $d = 2r$ (fig. 16)

$$\langle 9 \rangle \quad X_{c1} = 0,15 m\Omega / m \times 80 m = 12 m\Omega$$

$$\langle 6 \rangle \quad R_{c1} = \rho \cdot \frac{l}{s} = 0,036 \times \frac{80}{3 \times 400} = 2,4 m\Omega$$

Valores totais no ponto C:

$$X_C = X_B + X_d + X_{c1} = 6,51 + 0,15 + 12 = 18,66 m\Omega$$

$$R_C = R_B + R_{c1} = 1,2 + 2,4 = 3,6 m\Omega$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{3,6^2 + 18,66^2} = 19 m\Omega$$

Os resultados obtidos permitem avaliar a importância da limitação das correntes de curto-circuito devida aos cabos.

Corrente de curto-circuito “permanente” em C:

$$I_{ccC} = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot Z_C} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 19 \times 10^{-3}} = 12459 A$$

Potência de curto-circuito em C:

$$S_{ccC} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{ccC} = \sqrt{3} \times 410 \times 12459 \approx 8,8 MVA$$

Corrente de curto-circuito máxima assimétrica em C:

$$\frac{R_C}{X_C} = \frac{3,6}{18,66} = 0,19 \quad \Rightarrow \quad k \approx 1,55 \quad \Rightarrow \quad I'_{ccB} = 1,55 \times \sqrt{2} \times 12459 \approx 23710 A$$

IV – Defeito em D (terminais de motor BT)

[elementos relacionados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6)+(7, 8)+(9, 10)]

Serão adicionadas às anteriores as reactâncias e resistências do disjuntor e dos cabos de ligação.

9. disjuntor: $\langle 15 \rangle \quad X_d \approx 0,15m\Omega \quad R_d \approx 0$

10. ligação 2: 3 cabos unipolares, VV 35 mm², apertados em “trevo”

$$\langle 8 \rangle \quad X_{c2} = 0,09m\Omega / m \times 30m = 2,7m\Omega$$

$$\langle 6 \rangle \quad R_{c2} = \rho \cdot \frac{l}{s} = 0,0225 \times \frac{30}{35} = 19,3m\Omega$$

Valores totais no ponto D:

$$X_D = X_C + X_d + X_{c2} = 18,66 + 0,15 + 2,7 = 21,51m\Omega$$

$$R_D = R_C + R_{c2} = 3,6 + 19,3 = 22,9m\Omega$$

$$Z_D = \sqrt{R_D^2 + X_D^2} = \sqrt{22,9^2 + 21,51^2} = 31,42m\Omega$$

Corrente de curto-circuito “permanente” em D:

$$I_{ccD} = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot Z_D} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 31,42 \times 10^{-3}} \approx 7534A$$

Potência de curto-circuito em D:

$$S_{ccD} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{ccD} = \sqrt{3} \times 410 \times 7534 \approx 5,35MVA$$

Corrente de curto-circuito máxima assimétrica em D:

$$\frac{R_D}{X_D} = \frac{22,9}{21,51} = 1,06 \Rightarrow k \approx 1,05 \Rightarrow I'_{ccB} = 1,05 \times \sqrt{2} \times 7534 \approx 11187A$$

Pode constatar-se, para cada nível da rede, que é desprezável a influência dos disjuntores comparativamente com a dos outros elementos da rede.

V – Correntes de retorno dos motores

È frequentemente mais rápido considerar os motores como geradores independentes que debitam sobre o defeito uma “corrente de retorno” que se sobrepõe à corrente de defeito da rede.

- defeito em C

A intensidade debitada por um motor é calculada a partir da impedância “motor + cabo”:

$$\langle 10 \rangle \text{ e } \langle 12 \rangle \quad Z_M = \frac{e}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{50 \times 10^3} = 840m\Omega \Rightarrow Z_M \approx X_M = 840m\Omega$$

$$R_M \approx 0,2 \cdot X_M = 0,2 \times 840 = 168m\Omega$$

$$\begin{aligned}
\text{“Motor + cabo”} \Rightarrow \quad X_M &= 840 + 2,7 \approx 843 \text{ m}\Omega \\
R_M &= 168 + 19,2 \approx 188 \text{ m}\Omega \\
Z_M &= \sqrt{R_M^2 + X_M^2} \approx 864 \text{ m}\Omega \\
\Rightarrow \quad I_M &= \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_M} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 864 \times 10^{-3}} = 274 \text{ A}
\end{aligned}$$

Para os 20 motores, tem-se:

$$I_{MC} = 20 \times 274 = 5480 \text{ A}$$

Em vez de proceder a este cálculo, seria possível estimar (cf. <13>) a intensidade debitada por todos os motores em 3 vezes a sua intensidade nominal (95 A, com $\cos\varphi_M = 0,75$), ou seja: $(3 \times 95) \times 20 = 5700 \text{ A}$, valor que se revela ser bastante aproximado do valor calculado para I_{MC} : 5480 A.

A partir da relação $R_M/X_M = 188/843 = 0,22$ obtém-se $k \approx 1,5$ (fig. 9) e, por consequência:
 $I_{ccM} = 1,5 \times \sqrt{2} \times 5480 \approx 11630 \text{ A}$.

Nestas condições, a intensidade de curto-circuito (subtransitória) no barramento BT do quadro parcial passa de 12 459 A para 17 939 A e a corrente de curto-circuito máxima assimétrica de 27 310 A para 38 940 A.

- defeito em D

A impedância a considerar será 1 / 19 de Z_M acrescida da impedância do cabo:

$$\begin{aligned}
X_{MD} &= \left(\frac{X_M}{19} + X_{c2} \right) = \left(\frac{843}{19} + 2,7 \right) \times 10^{-3} \approx 47 \text{ m}\Omega \\
R_{MD} &= \left(\frac{R_M}{19} + R_{c2} \right) = \left(\frac{188}{19} + 19,2 \right) \times 10^{-3} \approx 29 \text{ m}\Omega
\end{aligned}$$

$$Z_{MD} = \sqrt{R_{MD}^2 + X_{MD}^2} = \sqrt{29^2 + 47^2} = 55 \text{ m}\Omega \Rightarrow I_{MD} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{MD}} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 55 \times 10^{-3}} \approx 4300 \text{ A}$$

Tem-se portanto em D uma corrente de curto-circuito total de $7\,534 + 4300 = 11\,834 \text{ A}$ (valor eficaz) e de valor máximo de $11\,887 + 6\,993 = \mathbf{18\,180 \text{ A}}$ ($R_{MD}/X_{MD} \approx 0,62 \Leftrightarrow k \approx 1,15 \Rightarrow I_{cc} = \sqrt{2} \times 1,15 \times 4300 = 6993 \text{ A}$).

- defeito em B

Tal como para o “defeito em C”, a intensidade debitada por um motor é calculada a partir da impedância “motor + cabo”:

$$\begin{aligned}
X_M &= (840 + 2,7 + 12) \times 10^{-3} \approx 855 \text{ m}\Omega \\
R_M &= (168 + 19,2 + 2,4) \times 10^{-3} \approx 189,6 \text{ m}\Omega
\end{aligned}$$

$$Z_M = \sqrt{855^2 + 189,6^2} = 876m\Omega \quad \Rightarrow \quad I_M = \frac{410}{\sqrt{3} \times 876 \times 10^{-3}} \approx 270A$$

Tem-se, portanto, para os 20 motores: $I_{MB} = 20 \times 270 = 5400A$.

Também aqui é possível utilizar a aproximação atrás citada (3 vezes a intensidade nominal de um motor: 95 A), ou seja 5700 A, valor que é bastante aproximado do calculado para I_{MB} .

Da relação $R/X = 0,22 \Rightarrow k \approx 1,5 \Rightarrow I_{cc} = 1,5 \times \sqrt{2} \times 5400 \approx 11455A$.

Portanto a intensidade de curto-circuito no QGBT passa de 35 758 A para 41 158 A e I_{cc} de 79 900 A para **91 355 A**.

Mas também neste caso, se o arco de defeito for tido em conta, a I_{cc} será reduzida para valores entre 45,6 e 73 kA.

- defeito em A (lado MT)

Em lugar de calcular as impedâncias equivalentes, é mais simples estimar (por excesso) a corrente de retorno dos motores em A, multiplicando o valor encontrado em B pela relação de transformação BT/MT $\langle 17 \rangle$, ou seja:

$$5400 \times \frac{410}{20 \times 10^3} \approx 110A$$

Este valor é desprezável quando comparado com a intensidade de 6 415 A atrás calculada.

Cálculo aproximado do defeito em D

Este cálculo explora todas as aproximações consideradas nos cálculos precedentes, tais como as das notas 15 e 16.

$$\sum X = 4,2 + 1,5 + 12 + 0,15 = 17,85m\Omega = X'_D$$

$$\sum R = 2,4 + 19,2 = 21,6m\Omega = R'_D$$

$$Z'_D = \sqrt{R'^2_D + X'^2_D} \approx 21,6m\Omega \quad \Rightarrow \quad I'_D = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z'_D} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 28,02 \times 10^{-3}} \approx 8448A$$

donde se obtém: $I'_{cc} = \sqrt{2} \times 8448 \approx 11945A$.

A este valor, para determinar I_{cc} (máximo assimétrico) é necessário somar a contribuição dos motores em tensão no momento do defeito; considere-se 3 vezes a sua intensidade nominal (95 A) $\langle 13 \rangle$: $(3 \times 95) \times 20 = 5700A$, donde se obtém:

$$I_{cc} = 11945 + \left[(3 \times 95 \times \sqrt{2}) \times 20 \right] = 20005A$$

Os resultados obtidos revelam-se bastante aproximados dos obtidos pelo cálculo completo (11 945 em vez de 11 843, e 20 005 em vez de 17 876), e sobretudo com desvios favoráveis do ponto de vista da segurança.

3. cálculo das Icc nas redes radiais por meio das componentes simétricas

interesse deste método

O cálculo com recurso às componentes simétricas revela-se particularmente útil quando uma rede trifásica é desequilibrada, dado que as impedâncias clássicas (ditas “cíclicas”) já não são normalmente utilizáveis devido, por exemplo, a fenómenos magnéticos. Assim, este cálculo torna-se necessário quando:

- um sistema de tensões e correntes é assimétrico (vectores de Fresnel com módulos diferentes e defasagens diferentes de 120°); é a situação que se verifica quando ocorre um curto-circuito monofásico (fase-terra), bifásico ou bifásico-terra;
- a rede comporta máquinas rotativas e/ou determinados transformadores (ligação Yyn, por exemplo).

Este método é aplicável a todos os tipos de redes de distribuição radial, qualquer que seja a sua tensão.

componentes simétricas (resumo)

Tal como o teorema de Leblanc diz que um campo alternado rectilíneo de amplitude sinusoidal é equivalente a dois campos girantes de sentidos inversos, a definição de componentes simétricas baseia-se na equivalência entre um sistema trifásico desequilibrado e a soma de três sistemas trifásicos equilibrados: directo, inverso e homopolar (conforme representado na figura 21).

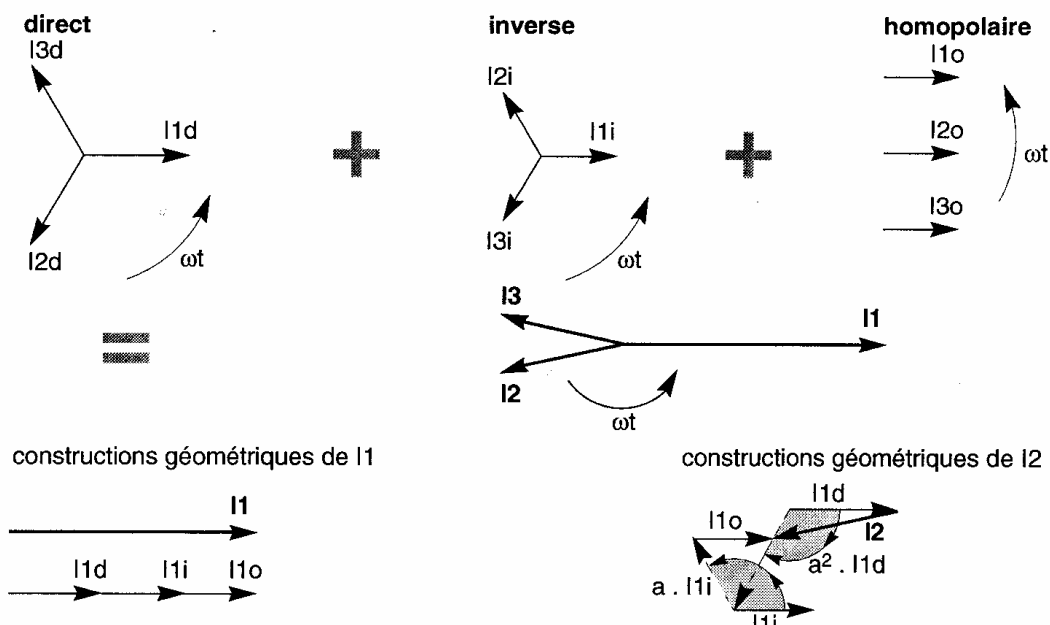


Fig. 21: construção gráfica da soma de três sistemas trifásicos equilibrados: directo, inverso e homopolar

O princípio da sobreposição é então utilizado para o cálculo das correntes de defeito.

Para a explicação que se segue, define-se o sistema tomando a corrente \vec{I}_1 como referência, sendo:

- \vec{I}_{1d} a sua componente directa,
- \vec{I}_{1i} a sua componente inversa,
- \vec{I}_{10} a sua componente homopolar

e utilizando o operador

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

entre \vec{I}_1 , \vec{I}_2 e \vec{I}_3 .

Este princípio, aplicado a um sistema de correntes, pode ser verificado graficamente (fig. 21). Por exemplo, a soma gráfica dos vectores dá, no caso de \vec{I}_2 , o seguinte resultado:

$$\vec{I}_2 = a^2 \cdot \vec{I}_{1d} + a \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{10}$$

As correntes \vec{I}_1 e \vec{I}_3 exprimem-se da mesma forma, obtendo-se o sistema:

$$\begin{aligned}\vec{I}_1 &= \vec{I}_{1d} + \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{10} \\ \vec{I}_2 &= a^2 \cdot \vec{I}_{1d} + a \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{10} \\ \vec{I}_3 &= a \cdot \vec{I}_{1d} + a^2 \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{10}\end{aligned}$$

As componentes simétricas de corrente estão relacionadas com as componentes simétricas de tensão por intermédio das impedâncias correspondentes:

$$Z_d = \frac{U_d}{I_d} \quad Z_i = \frac{U_i}{I_i} \quad Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

Elementos		Z_0
transformador (visto do secundário)		
sem neutro		∞
Yyn ou Zyn	fluxo livre	∞
	fluxo forçado	10 a 15 X_d
Dyn ou YNyn		X_d
primário D ou Y + zn		0,1 a 0,2 X_d
máquina		
síncrona		$\approx 0,5 Z_d$
assíncrona		≈ 0
linha		$\approx 3 Z_d$

Fig. 22 : característica homopolar dos diferentes elementos de uma rede eléctrica

Estas impedâncias são definidas a partir das características (indicadas pelos construtores) dos diferentes elementos da rede eléctrica estudada.

Entre estas características, importa ter em atenção que $Z_i \approx Z_d$ (excepto para as máquinas rotativas) e que Z_0 varia consoante os elementos (ver fig. 22).

Para aprofundar este assunto, uma apresentação mais detalhada deste método de cálculo das correntes de defeito franco e impedante é apresentada no Caderno Técnico n.º 18.

cálculo de acordo com a norma CEI 909

A norma CEI 909 define e apresenta um procedimento, utilizável por engenheiros não especializados, com utilização das componentes simétricas.

O procedimento é aplicável às redes eléctricas de tensão inferior a 230 kV, e explica o cálculo das correntes de curto-circuito máximas e mínimas. As primeiras permitem determinar as características nominais dos materiais eléctricos. As segundas são necessárias para a regulação das protecções contra sobreintensidades.

Esta norma é completada, para aplicação às redes BT, pelo guia CEI 781.

procedimento

1 – cálculo da tensão equivalente no ponto de defeito, igual a $c \cdot U_n / \sqrt{3}$, sendo c um factor de tensão cuja introdução nos cálculos é necessária para ter em conta:

- variações de tensão no espaço e no tempo,
- eventuais mudanças de tomada nos transformadores,
- comportamento subtransitório dos alternadores e dos motores.

Conforme os cálculos a efectuar e os níveis de tensão considerados, os valores normativos deste factor de tensão são indicados na figura 23.

2 – determinação e soma das impedâncias directa, inversa e homopolar a montante do local do defeito.

3 – cálculo da corrente de curto-circuito inicial, com a ajuda das componentes simétricas. Na prática, consoante o tipo de defeito, as fórmulas a considerar para o cálculo das I_{cc} são indicadas no quadro da figura 24.

4 – a partir do valor de I_{cc} (I_k''), cálculo das outras grandezas tais como I_{cc} de crista, I_{cc} permanente ou ainda I_{cc} permanente máxima.

tensão nominal U_n	factor de tensão c para o cálculo de	
	$I_{cc} \text{ max}$	$I_{cc} \text{ min}$
BT		
230-400 V	1	0,95
Outras	1,05	1
AT		
1 a 230kV	1,1	1

Fig. 23: valores do factor de tensão c (cf. CEI 909)

tipo de curto-circuito	I_k'' caso geral	defeito distante dos geradores
trifásico (Z_t qualquer)	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d }$	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d }$
<p>Em ambos os casos, a corrente de curto-circuito só depende de Z_d. Assim, Z_d é geralmente substituída por Z_k (impedância de curto-circuito no ponto de defeito) sendo $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$, em que: R_k – soma das resistências de uma fase situadas em série; X_k – soma das reactâncias de uma fase situadas em série.</p>		
bifásico isolado ($Z_t = \infty$)	$= \frac{c \cdot U_n}{ Z_d + Z_i }$	$= \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot Z_d }$
Monofásico	$= \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 }$	$= \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{ 2 \cdot Z_d + Z_0 }$
Bifásico terra (Z_{cc} entre fases = 0)	$= \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3} \cdot Z_i }{ Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_0 + Z_d \cdot Z_0 }$	$= \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{ Z_d + 2 \cdot Z_0 }$
<p>Notações utilizadas neste quadro:</p> <ul style="list-style-type: none"> tensão eficaz composta da rede trifásica = U corrente de curto-circuito em módulo = k'' impedâncias simétricas = Z_d, Z_i, Z_0 impedância de curto-circuito = Z_0 impedância de terra = Z_t 		

Fig. 24: valores das correntes de curto-circuito em função das impedâncias directa, inversa e homopolar da rede respeitante (cf. CEI 909)

incidência da distância entre o defeito e o alternador

Com este método de cálculo haverá sempre que distinguir dois casos:

- o dos curtos-circuitos distantes dos alternadores, que corresponde às redes nas quais as correntes de curto-circuito não têm componente alternada amortecida. É geralmente o caso verificado em BT, salvo quando receptores de forte consumo são alimentados por postos particulares AT/MT.
- e o dos curtos-circuitos próximos dos alternadores (cf. fig. 11), que corresponde às redes nas quais as correntes de curto-circuito têm componentes alternadas amortecidas. Este caso verifica-se geralmente em AT. Mas pode verificar-se também em BT quando, por exemplo, um gr4upo de emergência alimenta saídas prioritárias.

Estes dois casos têm como principais diferenças:

- para os curtos-circuitos afastados dos alternadores verifica-se a igualdade:
 - entre as correntes de curto-circuito inicial (I_k''), permanente (I_k) e interrompida (I_b), por um lado ($I_k'' = I_k = I_b$);
 - e entre as impedâncias directa (Z_d) e inversa (Z_i), por outro lado ($Z_d = Z_i$);

- enquanto para os curtos-circuitos próximos dos alternadores se verifica a seguinte desigualdade: $I_k < I_b < I_k''$; além disso Z_d não é necessariamente igual a Z_i .

Note-se entretanto que motores assíncronos podem também alimentar um curto-circuito, podendo o seu contributo atingir 3% da I_{cc} da rede durante os primeiros trinta milissegundos: a equação $I_k'' = I_k = I_b$ já não é então verdadeira.

condições a respeitar para o cálculo das correntes de curto-circuito máximas e mínimas

- o cálculo das correntes de curto-circuito **máximas** tem em conta os seguintes pontos:
 - o factor de tensão c a aplicar será o correspondente ao cálculo da corrente de curto-circuito máxima;
 - de todas as hipóteses e aproximações referidas neste documento, só devem ser consideradas as que conduzem a um cálculo por excesso;
 - as resistências R_L das linhas (linhas aéreas, cabos, condutores de fase e neutro) são consideradas para a temperatura de 20 °C.
- para o cálculo das correntes de curto-circuito **mínimas**, é necessário:
 - aplicar o valor do factor de tensão c correspondente à tensão mínima permitida pela rede;
 - escolher a configuração da rede, e em certos casos a alimentação mínima pelas fontes e linhas de alimentação da rede, que conduzem ao valor mínimo da corrente de curto-circuito no ponto de defeito;
 - ter em atenção a impedância de barramentos, transformadores de intensidade, etc.;
 - ignorar os motores;
 - considerar as resistências R_L à temperatura previsivelmente mais elevada:

$$R_L = \left[1 + \frac{0,004}{^{\circ}\text{C}} (\theta_e - 20^{\circ}\text{C}) \right] \times R_{L20}$$

onde R_{L20} é a resistência à temperatura 20°C e θ_e a temperatura (em °C) admissível para o condutor no final do curto-circuito.

O factor 0,004 / °C aplica-se ao cobre, ao alumínio e às ligas de alumínio.

equações das diferentes correntes

corrente de curto-circuito inicial I_k''

O cálculo das diferentes correntes de curto-circuito iniciais I_k'' é efectuado por aplicação das fórmulas do quadro da figura 24.

valor de crista i_p da corrente de curto-circuito

O valor de crista i_p da corrente de curto-circuito, nas redes não malhadas, pode ser calculado, qualquer que seja a natureza do defeito, a partir da seguinte fórmula:

$$i_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

em que

I_k'' - corrente de curto-circuito inicial

K - factor que é função das relações R / X , definido no ábaco da figura 9 ou calculado pela seguinte fórmula aproximada:

$$K = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}}$$

corrente de curto-circuito interrompida I_b

O cálculo da corrente de curto-circuito interrompida I_b não é necessário senão no caso de defeito próximo dos alternadores e quando a protecção é assegurada por disjuntores retardados. Recorde-se que esta corrente serve para determinar o PdC (poder de corte) destes disjuntores.

Esta corrente pode ser calculada com uma boa aproximação pela seguinte fórmula:

$$I_b = \mu \cdot I_k''$$

em que μ é um factor que é função do tempo morto mínimo t_{min} e da relação I_k'' / I_r (fig. 25) e que traduz a influência das reactâncias subtransitória e transitória, e I_r é a corrente nominal do alternador.

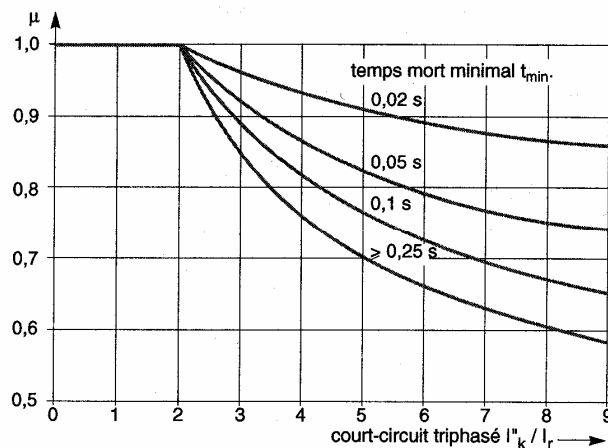


Fig. 25: factor μ para cálculo da corrente de curto-circuito interrompida I_b (cf. CEI 909)

corrente de curto-circuito permanente I_k

A amplitude da corrente de curto-circuito permanente I_k depende do estado de saturação do ferro dos alternadores, sendo o seu cálculo menos preciso que o da corrente simétrica inicial I_k'' .

Os métodos de cálculo propostos podem ser considerados como proporcionando uma estimativa suficientemente precisa dos valores superior e inferior para o caso em que o curto-circuito é alimentado por um alternador ou uma máquina síncrona. Assim:

- a corrente de curto-circuito permanente máxima, sob a excitação mais forte do gerador síncrono, é dada por:

$$I_{k_{\max}} = \lambda_{\max} \cdot I_r$$

- a corrente de curto-circuito permanente mínima é obtida para uma excitação constante (mínima) em vazio da máquina síncrona. É dada por:

$$I_{k_{\min}} = \lambda_{\min} \cdot I_r$$

em que I_r é o valor nominal da corrente aos terminais do alternador e λ é um factor que depende da indutância de saturação $X_{d \text{ sat}}$.

Os valores de λ_{\max} e λ_{\min} são dados pela figura 26 para os turboalternadores e pela figura 27 para as máquinas de pólos salientes.

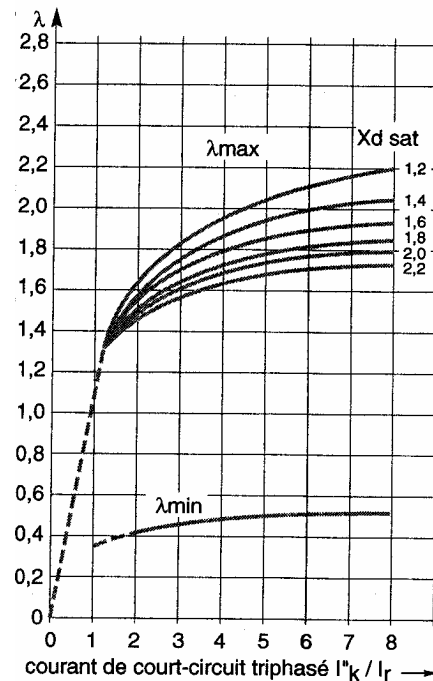


Fig. 26: factores λ_{\max} e λ_{\min} para turboalternadores

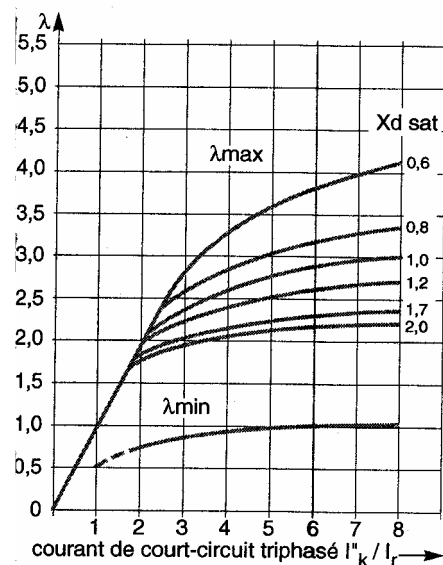


Fig. 27: factores λ_{\max} e λ_{\min} para alternadores de pólos salientes (cf. CEI 909)

exemplo de cálculo

problema:

Quatro redes, sendo 3 de 5 kV e uma de 15 kV, são alimentadas por uma rede de 30 kV a partir dos transformadores da subestação E (cf. fig. 28). Para a construção da linha GH pretende-se determinar o poder de corte do disjuntor M.

Especifica-se que:

- as únicas ligações à terra são as dos secundários dos transformadores da subestação E;
- para uma linha de 30 kV, a reactância é da ordem de grandeza de $0,35 \Omega/\text{km}$ em regime directo e inverso, e de $3 \times 0,35 \Omega/\text{km}$ em regime homopolar;
- a reactância de curto-circuito dos transformadores é de 6% para o posto E e de 8% para os outros;
- o coeficiente c multiplicando de U é considerado igual a 1,1;
- todas as cargas ligadas aos pontos F e G são essencialmente passivas;
- todas as resistências são desprezáveis face às reactâncias.

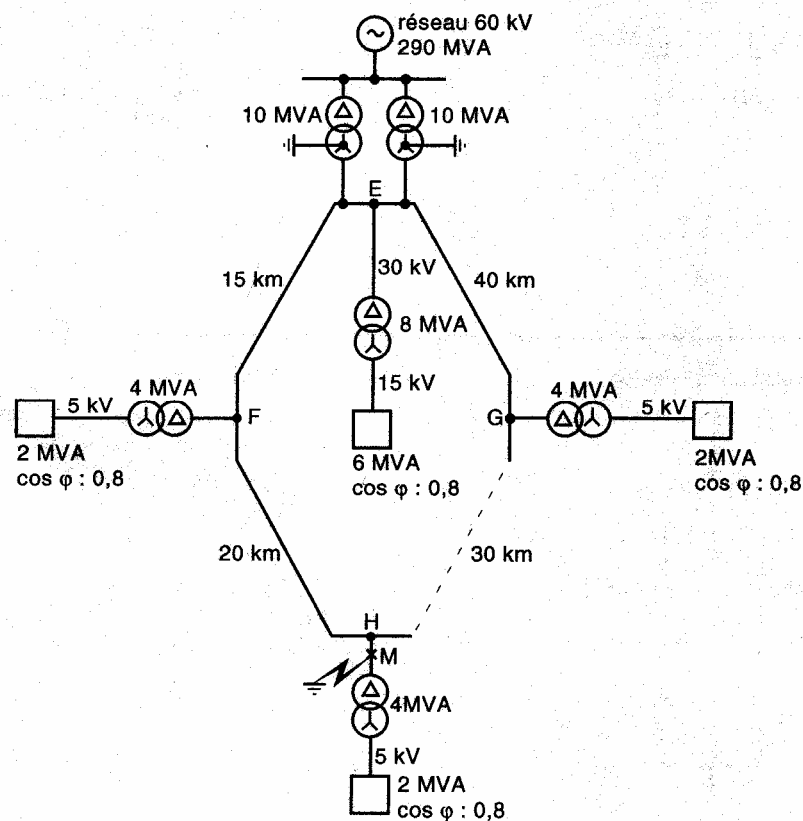


Fig.28

resolução:

- tendo em atenção o esquema directo e inverso (cf. fig. 29), pode escrever-se:

$$a = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{30^2}{290} \Rightarrow j3,1\Omega$$

$$b = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{6}{100} \times \frac{30^2}{10} \Rightarrow j5,4\Omega$$

$$c_1 = 0,35 \times 40 \Rightarrow j14\Omega$$

$$c_2 = 0,35 \times 30 \Rightarrow j10,5\Omega$$

$$c_3 = 0,35 \times 20 \Rightarrow j7\Omega$$

$$c_4 = 0,35 \times 1 \Rightarrow j5,25\Omega$$

$$d = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{8} \Rightarrow j9\Omega$$

$$e = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{6} \times 0,6 \Rightarrow j90\Omega$$

$$f = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{4} \Rightarrow j18\Omega$$

$$g = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{2} \times 0,6 \Rightarrow j270\Omega$$

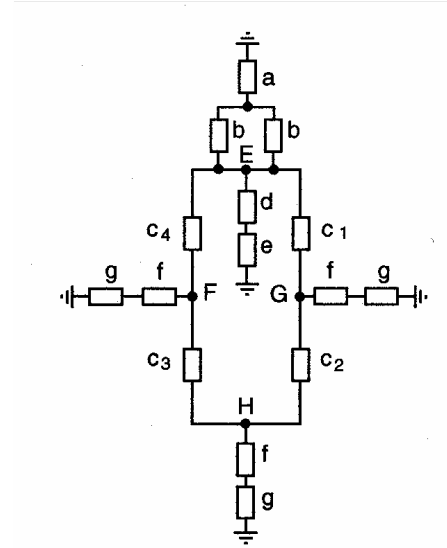


Fig. 29:

- no esquema homopolar (cf. fig. 30) deve ter-se em atenção que:
 - os enrolamentos em triângulo dos transformadores do posto E detêm as correntes homopolares, e a rede portanto não as “vê”;
 - da mesma forma, os transformadores dos postos F, G e H não vêem as correntes homopolares por causa dos seus enrolamentos em triângulo, e portanto apresentam uma impedância infinita para o defeito.

$$b' = b = j5,4\Omega$$

$$c'_1 = 3 \times c_1 = j42\Omega$$

$$c'_2 = 3 \times c_2 = j31,5\Omega$$

$$c'_3 = 3 \times c_3 = j21\Omega$$

$$c'_4 = 3 \times c_4 = j15,75\Omega$$

$$d' = \infty$$

$$f' = \infty$$

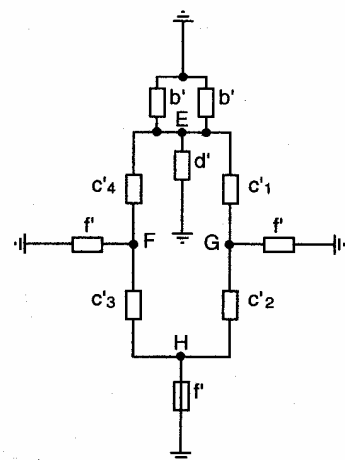


Fig. 30

- haverá agora dois esquemas reduzidos para estudar:

- linha GH aberta (cf. fig. 31)

$$Z_d = Z_i = j17,25 \Omega$$

$$Z_0 = j39,45 \Omega$$

$$I_{cc3} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_d| \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,1 \times 30}{17,25 \times \sqrt{3}} \approx 1,104 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_0|} = \frac{1,1 \times 30 \times \sqrt{3}}{17,25 + 17,25 + 39,45} \approx 0,773 \text{ kA}$$

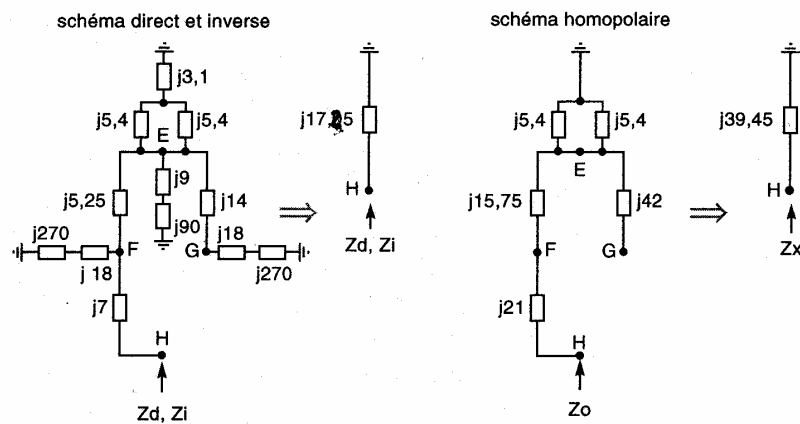


Fig. 31

- linha GH fechada (cf. fig. 32)

$$Z_d = Z_i = j13,05 \Omega$$

$$Z_0 = j27,2 \Omega$$

$$I_{cc3} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_d| \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,1 \times 30}{13,05 \times \sqrt{3}} \approx 1,460 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = \frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_0|} = \frac{1,1 \times 30 \times \sqrt{3}}{13,05 + 13,05 + 27,2} \approx 1,072 \text{ kA}$$

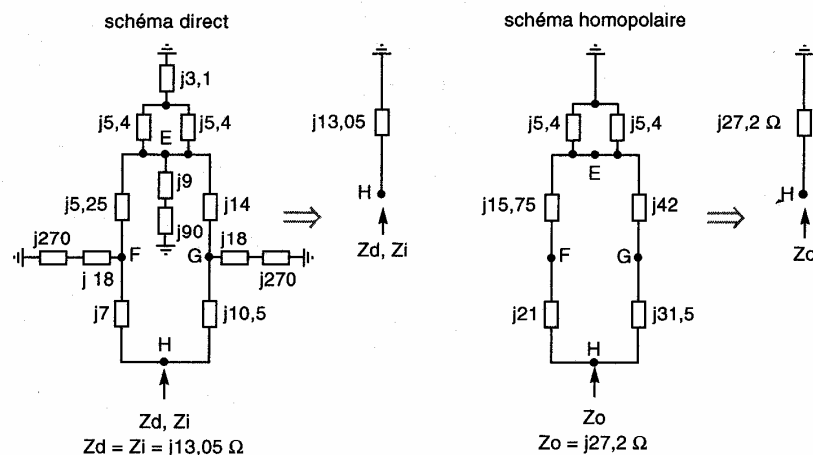


Fig. 32

Em função da corrente de curto-circuito mais importante ($I_{cc3} = 1,460 \text{ kA}$) o disjuntor de linha no ponto M deve portanto ser dimensionado para:

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = 30 \times 1,460 \times \sqrt{3}$$

$$\mathbf{P \approx 76 \text{ MVA}}$$

4. cálculos por computador e conclusão

Para cálculo da corrente de curto-circuito, diversos métodos foram desenvolvidos e encontraram lugar nas normas... e também neste Caderno Técnico.

Vários destes métodos normalizados foram concebidos de forma a que a corrente de curto-circuito pudesse ser calculada à mão ou com uma calculadora de bolso. Mas desde que apareceu, nos anos 70, a possibilidade de cálculo científico em ordenador os projectistas de instalações eléctricas desenvolveram programas para as suas próprias necessidades, inicialmente para grandes sistemas informáticos e depois para os “mini”. A sua utilização, delicada, era reservada aos iniciados.

Estes programas foram posteriormente desenvolvidos para os computadores pessoais (ou Personal Computer - PC) de utilização mais simples. Assim, nos nossos dias, existem numerosos programas conformes às normas para cálculo das Icc em BT, como é o caso do **Ecodial**, criado e comercializado pela Merlin Gerin.

Todos estes programas de cálculo das correntes de curto-circuito servem essencialmente para determinar poderes de corte e de fecho de aparelhos, bem como para a suficiência electromecânica dos equipamentos.

Finalmente outros programas de cálculo são utilizados por especialistas em concepção de redes, por exemplo para os estudos de comportamento dinâmico das redes eléctricas.

Tais programas permitem simulações precisas dos fenómenos no tempo, alargando-se a sua utilização ao comportamento electromagnético completo das redes e das instalações.

Não é menos verdade entretanto que todos os programas, se bem que muito úteis, não passam de ferramentas. A sua utilização, para ser eficaz, exige portanto uma competência profissional previamente adquirida através do estudo bem como habilidade e experiência.